

TEKNILLINEN KORKEAKOULU
RAKENNUS- JA MAANMITTAUSTEKNIIKAN OSASTO
VESIRAKENNUKSEN OPPITUOLI

Kirsi Heino
VESIRAKENTEIDEN JÄÄKUORMAT

Diplomityö, joka on jätetty opinnäytteenä
tarkastettavaksi diplomi-insinöörin tutkintoa
varten Espoossa 7.12.1992

Kirsi Heino
Kirsi Heino

TEKNILLINEN KORKEAKOULU
RAKENNE- JA YHDYSKUNTATEKNIIKAN
LAITOSTEN KIRJASTO

Tekijä ja työn nimi:

Kirsi Heino
Vesirakenteiden jääkuormat

Päivämäärä: 7.12.1992**Sivumäärä:** 90**Osasto:** Rakennus- ja maanmittaustekniikan
osasto**Professuuri:** Yhd - 12
Vesirakennus**Työn valvoja:** va apulaisprofessori Antti Hepojoki**Työn ohjaaja:** diplomi-insinööri Klaus Martonen

Suomessa esiintyviä vesirakenteita kuormittavia jäämuotoja ovat tasainen ja murskautunut jää sekä yksivuotinen ahtojäävallit. Jääkuormia ovat: tasaisen ja ahtojään aiheuttamat sekä dynaamiset, termiset ja jäään kiinnittymisestä johtuvat. Fransson on kehittänyt jääkuoren rakoilun huomioon ottavan menetelmän, jolla voidaan arvioida rakenteeseen kohdistuva terminen jääkuorma. Suomen sääolosuhteissa jääkuormilla on suuri merkitys vesirakenteiden mitoituksessa ja käytössä. Jääkuormia ei kuitenkaan tunneta kunnolla, joten rakenteet mitoitetaan melko usein väärin.

Jäätutkimukseen on käytetty Suomessa paljon voimavaroja. Vuonna 1985 Teknologian kehittämiskeskus (TEKES) käynnisti arktisen projektin, jonka tarkoituksena oli arktisten luonnonvarojen hyödyntäminen. Öljyn hinnan romahduksen seurauksena arktisen projektin painopiste siirtyi tutkimukseen. Jäätutkimuksen ongelmana Suomessa on, etteivät vesirakenteiden kanssa tekemisissä olevien ja tutkijoiden kiinnostuksen kohteet ole samat.

Author and name of the thesis:

Kirsi Heino
Ice loads against marine structures

Date: 7.12.1992**Number of pages:** 90**Department:** Civil Engineering and
Surveying**Professorship**
Hydraulic Engineering**Supervisor:**

Acting associate professor Antti Hepojoki

Instructor: Klaus Martonen, M. Sc. (C.E.)

In Finland marine structures are loaded by level ice, crushed ice and ice ridges. Ice loads are caused by ice sheet, ice ridges, and adhered ice or they are of dynamic or thermal origin. Fransson has created the method for estimating thermal ice loads, which takes into account cracks in ice sheet. In Finnish weather conditions ice loads have a significant influence on both dimensioning and using marine structures. As ice loads are not properly understood structures are occasionally misdimensioned.

A lot of resources has been used for ice research in Finland. In 1985 the Technology Development Centre (TEKES) began an arctic project, the purpose of which was to exploit the natural resources in arctic areas. Due to the collapse of oil prices the emphasis of the project was shifted to research. The major problem of the ice research in Finland is that the interests of researchers do not meet with the interests of those involved in marine structures.

SISÄLLYSLUETTELO	sivu
TIIIVISTELMÄ	2
ABSTRACT	3
SISÄLLYSLUETTELO	4
SYMBOLILUETTELO	7
ALKUSANAT	11
1 JOHDANTO	12
2 JÄÄN MEKAANISET OMINAISUUDET	
2.1 Yleistä	12
2.2 Jääkiteen rakenne ja koko	12
2.3 Jäätyypit	14
2.4 Suolaisuus	14
2.4.1 Yleistä	14
2.4.2 Suolaisuuden vaikutus lujuuteen	16
2.5 Huokoisuus	18
2.6 Jäämuodot	19
2.6.1 Tasainen jää ja murskautunut jää	19
2.6.2 Ahtojäävalli	19
2.7 Jään murtomallit	22
2.7.1 Yleistä	22
2.7.2 Taivutusmurto	23
2.7.3 Puristusmurto	25
2.7.4 Leikkausmurto	26
2.7.5 Lommahdus	27
3 YMPÄRISTÖOLOSUHTEET	
3.1 Jääkenttien voimat	28
3.1.1 Yleistä	28
3.1.2 Tuuli ja veden virtaus	28

3.2	Jääkartat ja jäätilastot	33
3.3	Vedenkorkeuden vaihtelut	35
4	SUOMESSA TEHDYT JÄÄTUTKIMUKSET 1970-90	
4.1	Yleistä	37
4.2	Valtion teknillinen tutkimuskeskus	37
4.3	Teknillinen korkeakoulu	39
4.4	Oulun yliopisto	40
4.5	Merenkulkuhallitus	40
4.6	Merentutkimuslaitos	41
4.7	Teknologian kehittämiskeskus	41
5	AVOMERIRAKENTEIDEN JÄÄKUORMAT	
5.1	Yleistä	42
5.2	Tasaisen jään aiheuttamat kuormat	43
5.2.1	Kuormitusohjeet	43
5.2.1.1	Pysähtynyt jääkenttä tai jäälautta	44
5.2.1.2	Liikkuva jääkenttä tai jäälautta	47
5.2.2	Sivusuhteen huomioonottava laskentamalli	49
5.2.2.1	Kapeat rakenteet	49
5.2.2.2	Keskileveät rakenteet	51
5.2.2.3	Leveät rakenteet	52
5.3	Ahtojääkuormat	54
5.3.1	Kuormitusohjeet	54
5.3.2	Sivusuhteen huomioonottava laskentamalli	55
5.3.2.1	Kapeat rakenteet	55
5.3.2.2	Keskileveät rakenteet	56
5.3.2.3	Leveät rakenteet	58
5.3.3	Maamekaniikkaan perustuva laskentamalli	60

5.4	Kiinnittymisjääkuormat	61
5.4.1	Kuormitusohjeet	61
5.4.2	Sivusuhteen huomioonottava laskentamalli	63
5.4.2.1	Kapeat rakenteet	63
5.4.2.2	Keskileveät rakenteet	63
5.4.2.3	Leveät rakenteet	69
5.5	Dynaamiset kuormat	69
5.5.1	Kuormitusohjeet	69
5.5.2	Venäläinen jokistandardi	70
5.5.3	Likimääräis menetelmä	71
5.5.4	Jään ja rakenteen dynaamisen vuorovaikutuksen malli	72
6	SAARISTON JA SUOJAISTEN ALUEIDEN RAKENTEIDEN JÄÄKUORMAT	
6.1	Jään lämpölaajeneminen	75
6.2	Termiset jääkuormat	75
7	YHTEENVETO	79
	ASiantuntijahaastattelut	80
	Kuvaluettelo	81
	Taulukkoluuettelo	84
	Lähdeluettelo	85

SYMBOLILUETTELO

A	jääkentän pinta-ala
A	jäälautan pinta-ala
A_1, A_2, A_3, A_4	kertoimia
$a_0, a_1, a_2, a_3, a_4, a_5, a_6, a_7$	integroitivakioita
a_3	kerroin
B	ahtojäävallin leveys
B	rakenteen leikkauspinnan pituus jään vaikutustasolla
B_1, B_2	kertoimia
b	rakenteen leveys
C_D	vastuskerroin
C_x	jään vapaa puristuslujuus
C_0	kerroin
c	koheesio
c	jään virumisvakio
$c(z)$	pintakitkan kerroin
D	rakenteen leveys
D	rakenteen halkaisija
D_T	kartion huipun halkaisija
d	rakenteen halkaisija
d	jään paksuus
d_g	todellinen raekoko
d_5	vertailuraekoko
E	jään kimmokerroin
F	horisontaalivoima
F	jään murskautumisvoima
F_c	tasaisen jään murskautumiskuorma
F_i	jään ja ilman välinen kitkavoima
F_v	jään ja veden välinen kitkavoima
f_c	kontaktikerroin
G	jääkentän tai jäälautan paino
H	vaakavoima
H	ahtojäävallin korkeus
H_k	vallin kölin syvyys
H_s	vallin purjeen korkeus
h	jään paksuus

$h^{(n)}$	liikkuvan jään suurin mahdollinen paksuus
h_t	jääpeitteen maksimivahvuus
h_0	murtuvan jään suurin paksuus
I	tunkeumakerroin
i	vedenpinnan kaltevuus
k	kontaktikerroin
k	Karmanin vakio
k	rakenteen jousivakio
k_s	kerroin
k_v	rakenteen läpimitan ja jään paksuuden suhteesta riippuva kerroin
k_y	pilarin jousivakio
k_1	muotokerroin
k_2	jään ja rakenteen välinen kosketuskerroin
k_3	muotosuhdekerroin
k_4	muotosuhdekerroin
L	röykkiötä pitkin nousevan jäälevyn pituus
L	rajoittuvan jääkuoren pituus
M	taivutusmomentti
m	jään massa
m_j	kerroin
m_e	kerroin
n	jäämassan huokoisuus
P	jään kuorma rakenteeseen
P_c	terminen jääkuorma
P_1	jään pinnan suuntainen tuulikuorma
P_2	veden virtauksen suuntainen kuorma jäälautan alapintaan
P_3	jäälautan painon vaakasuora komponentti
P_4	virtauskuorma jäälautan reunaan
P_5	aaltokuorma lautan reunaan
q	liikenopeudesta johtuva paine
q	rakenteen ja jään välinen adheesiolujuus
q_k	tuulenpaine
R_c	jään murskautumislujuus
S	jään suolaisuus
T	jään lämpötila
T	törmäysreaktion voimakomponentti

T	jääpeitteen muodonmuutos aika
T_0	jään pinnan alkulämpötila
ΔT	ajanjakson pituus, jolloin jää liikkuu
t	jään paksuus
t	jäämurskan paksuus
t	ahtojäävallin paksuus
t	aika
t_R	kartiota pitkin ylösnousseen jääkerroksen paksuus
U	ilman tai veden nopeus
u	vedenpinnan nousu- tai laskunopeus
V_v	vedenpinnan nousu- tai laskunopeus
v	jään nopeus
$v(z)$	ilman tai veden virtausnopeus
v_b	suhteellinen suolavesipitoisuus
w	tuulen nopeus
w_t	suurin odotettavissa oleva tuulen nopeus
Z	rakenteen kaltevan osan korkeus
z	mittauskohdan etäisyys jään pinnasta
z_0	rajapinnan karkeutta kuvaava mitta
α	kiilakulman puolikas
α	ei-lineaarinen funktio saarien ja matalikkojen välisestä etäisyydestä
α	rakenteen kaltevuuskulma
α	pituuden lämpölaajenemiskerroin
β	rakenteen kaltevuuskulma vaakatasosta
β	jännitysjakautuman muotofunktio
γ	ahtojään huokoisuus
γ_w	veden tilavuuspaino
ϵ	kuormitusnopeus
η	kitkavoiman aiheuttava osa vallin purjeen massasta
θ	jääröykkiön kallistuskulma
μ	muovautumiskerroin
μ	jään ja rakenteen välinen kitkakerroin
μ	jään ja röykkiön välinen kitkakerroin
μ_1	pinnan karkeudesta riippuva kerroin
μ_k	hydrodynaaminen muotokerroin

ρ	jään tiheys
ρ_i	puhtaan jään tiheys
ρ_w	veden tiheys
σ	merijään lujuus
σ_{01}	paikallinen paine
σ_f	jään taivutuslujuus
σ_{g1}	paikallisen paineen geometrinen keskipoikkeama
σ_{ip}	jään puristuslujuuden ominaisarvo
σ_{it}	jään taivutuslujuus
σ_{it}	jään taivutuslujuuden ominaisarvo
σ_t	jään taivutuslujuus
σ_0	jään peruslujuus
$\sigma_{0,5}^{\max}$	suurin jännitys jään keskellä
τ_0	jään leikkauslujuus
ϕ	murskautuneen jään kitkakulma
ϕ	ahtojäävallin sisäinen kitkakulma
ϕ	vallin kiilan kulma vaakatasoon nähden
ϕ	ajan funktio
Ω	jääkentän pinta-ala

ALKUSANAT

Tämän diplomityön olen tehnyt vuoden 1992 aikana merenkulkuhallituksen väyläosastolla. Työn valvojana on ollut va apulaisprofessori Antti Hepojoki teknillisen korkeakoulun rakennus- ja maanmittaustekniikan osastolta. Työn ohjaajana on toiminut diplomi-insinööri Klaus Martonen merenkulkuhallituksen väyläosastolta. Heille molemmille haluan esittää lämpimät kiitokseni työn aikana saamastani avusta. Samoin haluan kiittää haastattelemiani asiantuntijoita heidän jäätutkimusta koskevista kommentistaan.

Helsingissä 7.12.1992

Kirsi Heino

1 JOHDANTO

Tässä diplomityössä on käsitelty vesirakenteisiin kohdistuvia jääkuormia ja jäätutkimusta Suomessa. Työn tavoitteena oli esittää ohjearvoja eri olosuhteissa käytettäville jääkuormille ja tehdä yhteenveto Suomessa viimeisen kahden vuosikymmenen aikana tehdystä jäätutkimuksesta. Tietoa koottiin käsikirjoista, kongressijulkaisuista, muusta alan kirjallisuudesta ja asiantuntija-haastatteluista.

Suomen ilmastossa jääolosuhteilla on suuri merkitys vesirakenteiden: satamien, merenkulun turvalaitteiden ja laitureiden suunnittelussa, rakentamisessa ja käytössä. Jään pysty- ja vaakaliikkeet sekä jään muodostuminen joudutaan ottamaan huomioon yleissuunnittelussa ja rakenteiden valinnassa. Puutteellisen tiedon vuoksi rakenteet usein mitoitetaan väärin.

2 JÄÄN MEKAANISET OMINAISUUDET

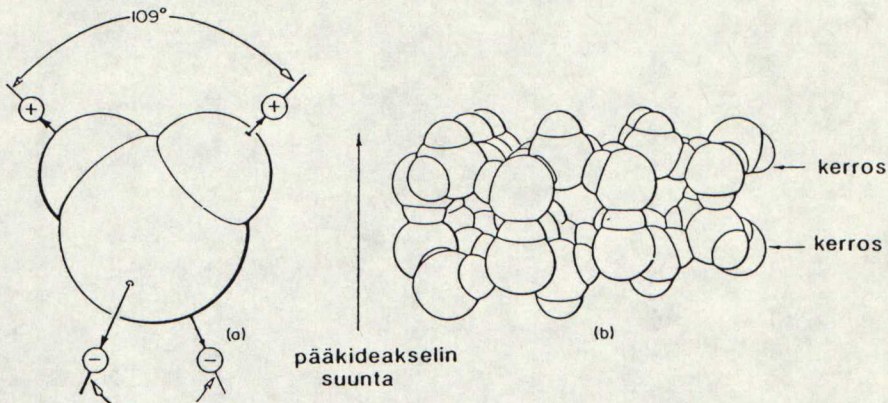
2.1 Yleistä

Puhtaan jään tiheys on 917 kg/m^3 . Kastuneesta lumesta jäätymällä muodostuvan kohvajään tiheys on ilmapitoisuudesta riippuen $800 \dots 910 \text{ kg/m}^3$. Jään lämpöpitenemiskerroin on pinnan suunnassa $5 \dots 6 \cdot 10^{-5} / ^\circ\text{C}$. Lämmönjohtavuus on $0 \text{ } ^\circ\text{C}$ lämpötilassa $2,23 \text{ J/(ms}^\circ\text{C)}$. Se on $10 \dots 20$ -kertainen verrattuna kuivan, tiheydeltään 200 kg/m^3 olevan lumen lämmönjohtavuuteen. Jään ominaislämpö on noin puolet veden ominaislämmöstä. [1, s. 48]

2.2 Jääkiteen rakenne ja koko

Vesimolekyyli koostuu yhdestä happiatomista ja kahdesta vetyatomista, jotka ovat liittyneet toisiinsa vetysidoksella. Molekyylit muodostavat kidehilan, jossa jokainen vetyatomi on kahden happiatomin välissä. Kidehila muodostuu poimuisista atomikerroksista, joita vastaan koh-tisuoran akselin eli pääkideakselin suunnassa katsottuna

jään rakenne on kuusikulmainen. [2, s. 16-4] Täysin virheetöntä jääkidettä ei kuitenkaan esiinny luonnossa, vaan molekyylirakenteessa esiintyy epäsäännöllisyyksiä. Nämä kidevirheet vaikuttavat jään käyttäytymiseen eri olosuhteissa.



Kuva 1. Vesimolekyyli (a) ja pieni osa jääkidettä (b). [2, s. 16-4]

Kidehila muodostuu samanlaisista kerroksista, joita on mahdollista liu'uttaa toisiinsa nähden rikkomatta kidehilan yhtenäisyyttä. Tämä kuvaa jääkiteiden käyttäytymistä kuormituksen alaisena. Kun jää sulaa, hilarakenne tuhoutuu osittain ja vesimolekyylit kasautuvat lähemmäksi toisiaan. Tämän vuoksi veden tiheys on suurempi kuin jään. [2, s. 16-4] Jään sulaminen alkaa kiteiden rajoilta, mikä vähentää tartuntaa niiden välillä. Tämän takia jään kiderajojen merkitys jään mekaanisiin ominaisuuksiin on suuri sulamispisteen lähellä. [3, s. 3.1]

Jään kidekoko riippuu tavasta, jolla jää on syntynyt. Tämä pätee puikkojäähän, joka on muodostunut tyynessä vedessä jäätymällä alaspäin. Näin muodostuu jäätä, joka on kirkasta, kovaa ja haurasta sekä lujempaa pystysuorassa kuin vaakasuorassa suunnassa. [4, s. 25]

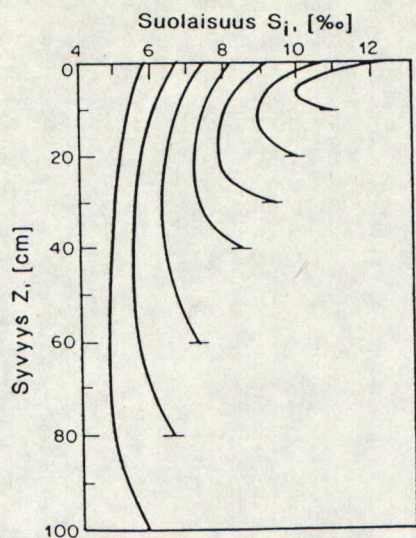
2.3 Jäätyypit

Yleisimmät jäätyypit ovat: puikkojää, jonka kidekoko on 5...25 mm, kohvajää kidekoko 1..4 mm ja jäähile kidekoko 1...4 mm. Kahdella ensiksi mainitulla kiteet ovat suuntautuneet satunnaisesti. Puikkojää muodostuu suhteellisen tyynessä vedessä sekundäärisessä jäänkasvuvaiheessa. Jää muodostuu kynänmuotoisista kiteistä siten, että murskautumista vastaan vahvin akseli on pystysuuntainen. Kohvajää on kiteistä, läpikuultamatonta ja valkoista. Se saa alkunsa, kun sade kastelee lumipeitteen tai lumi joutuu kosketuksiin veden kanssa. Jäähile muodostuu alijäähtyneessä, turbulenttisessa vedessä, jossa lämpötila on juuri jäätymispisteen alapuolella. Jäähile on taipuisaa ja isotrooppista. [4, s. 26]

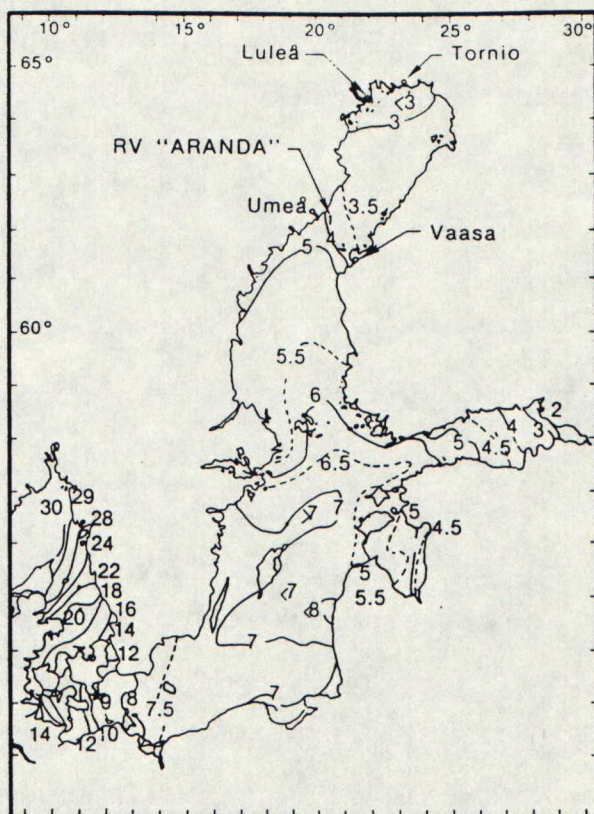
2.4 Suolaisuus

2.4.1 Yleistä

Pohjanlahden suolaisuus on 3...4‰. Uuden jään suolaisuus on $\frac{1}{3}$ pintaveden suolaisuudesta. [5, s. 7] Jään suolaisuus on 20 % veden suolaisuudesta jään ollessa alle 2 kk ikäistä ja 15%, kun ikää on enemmän kuin 2 kk. [6, s. 34] Jään suolavesipitoisuus riippuu jään jäätymisnopeudesta ja iästä siten, että uudessa jäässä suolavesipitoisuus on korkea. [3, s. 2.6] Kuvassa 2 esitetään jään suolaisuusprofiileja jään paksuuden vaihdellessa ja kuvassa 3 Itämeren pintaveden keskimääräiset suolaisuudet marraskuussa.



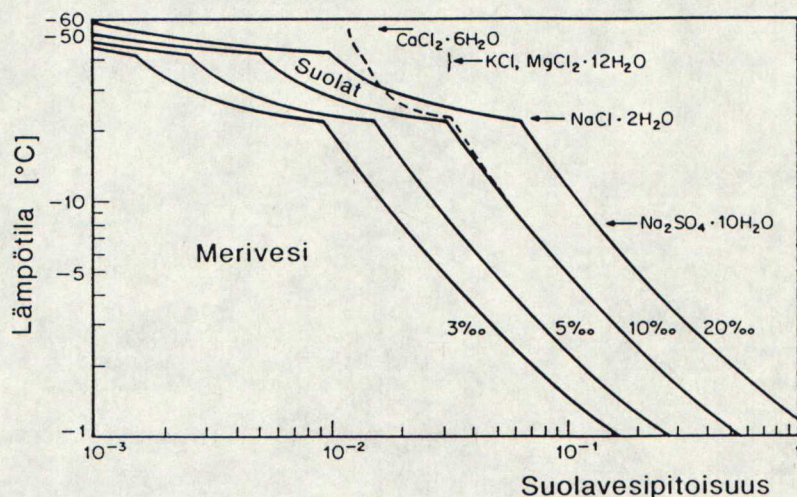
Kuva 2. Jääkuoren suolaisuusprofiileja.
(Weeks & Assur, 1967) [3, s. 2.7]



Kuva 3. Itämeren pintaveden keskimääräinen suolaisuus marraskuussa. [7, s. 5]

2.4.2 Suolaisuuden vaikutus lujuuteen

Jään suolavesipitoisuus on funktio jään suolaisuudesta ja lämpötilasta ja se voidaan arvioida kuvan 4 avulla. Ku-
vasta 4 huomataan, että jään suolavesipitoisuus V_b on 0,02
lämpötilassa $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ ja 0,0065 lämpötilassa $-25\text{ }^{\circ}\text{C}$, kun
veden suolaisuus on 4 ‰.



Kuva 4. Suolavesipitoisuus jään suolaisuuden ja lämpötilan muuttuessa (Anderson, 1960) [3, s. 2.7]

Merijään lujuus σ saadaan puikkojään lujuudesta kaavalla [6, s. 16]

$$\sigma = \sigma_0 (1 - 2v_b^{1/2}) \quad (1)$$

jossa σ_0 on jään peruslujuus yhtälöistä 3, 4, 6 ja 7
 v_b suhteellinen suolavesipitoisuus kaavasta 2

$$v_b = S(0,532 - 49,12/T), \quad v_b < 0,11 \quad (2)$$

jossa S on jään suolaisuus (tavallisesti ‰)
 T jään lämpötila [$^{\circ}\text{C}$]

Puhtaan veden puikkojään vetolujuus on käytännössä riippumaton lämpötilasta. Peruslujuus on

$$\sigma_0 = 96 \dot{\epsilon}^{1/3} (d_5/d_g)^{1/2} \text{ [MPa]} \quad (3)$$

$$\dot{\epsilon} < 2 * 10^{-6} \text{ 1/s} \quad (\text{myötöalue})$$

tai

$$\sigma_{0\max} = 1,1 (d_5/d_g)^{1/2} \text{ [MPa]} \quad (4)$$

$$\dot{\epsilon} > 2 * 10^{-6} \quad (\text{hauras})$$

joissa $\dot{\epsilon}$ on kuormitusnopeus [1/s]

d_5 vertailuraekoko = 5 mm

d_g todellinen raekoko [mm]

Ympyränmuotoiselle poikkileikkaukselle kuormitusnopeus $\dot{\epsilon}$ on [4, s. 11]

$$\dot{\epsilon} = v/(4d) \quad (5)$$

jossa v on jään nopeus [m/s]

d rakenteen halkaisija [m]

Jään puristuslujuus riippuu lämpötilasta korkeilla kuormitusnopeuksilla jään käyttäytyessä hauraasti. Yhtälöt ovat

$$\sigma_0 = 96 \dot{\epsilon}^{1/3} (d_5/d_g)^{1/3} \text{ [MPa]} \quad (6)$$

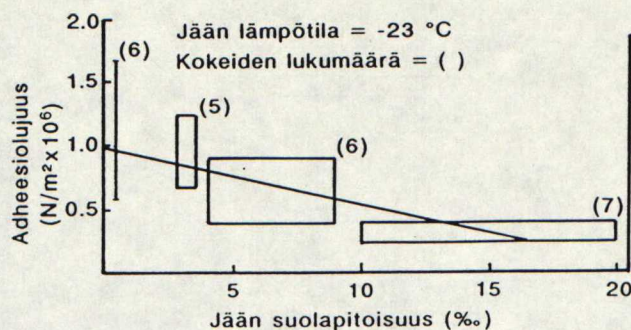
$$\dot{\epsilon} < 5,8 * 10^{-4} \text{ 1/s} \quad (\text{myötö})$$

$$\sigma_{0\max} = 2,2 [(d_5/d_g)^{1/2} + 0,21 T^{0,78}] \text{ [MPa]}$$

$$\dot{\epsilon} > 5,8 * 10^{-4} \text{ 1/s} \quad (\text{hauras}) \quad (7)$$

jossa T on jään lämpötila [°C]

Sackinger & Sackingerin mittausten mukaan (kuva 5) jään adheesiolujuus pienenee jään suolaisuuden kasvaessa.



Kuva 5. Adheesiolujuus jään suolapitoisuuden muuttuessa. [6, s. 69]

2.5 Huokoisuus

Jään huokoisuus määrittää jään mekaaniset, sähköiset ja lämpöominaisuudet. Huokoisuuden mittaaminen on vaikeaa, mutta se voidaan laskea mitatusta suolaisuudesta, lämpötilasta ja tiheydestä. Uudessa jäässä suolaisuus ja meriveden määrä ovat korkeita. Jään paksuuden kasvaessa huokoisuus pienenee. [8, s. 12] Ahtojään huokoisuutta voidaan arvioida jäältä poratuista näytteistä. Merentutkimuslaitoksen mittauksissa ahtojäävällin huokoisuudeksi saatiin 27 %. [9, s. 32]

Jään suhteellinen kaasutilavuus lasketaan kaavalla [8, s. 12]

$$V_a = 1 - \rho / \rho_w [\rho_w / \rho_i (1 - S/1000)] \quad (8)$$

$$-(-55.1/T) (\rho_w - \rho_i) / \rho_i (S/1000)]$$

jossa ρ on jään tiheys [kg/m³]

S suolapitoisuus

T lämpötila

ρ_w veden tiheys [= 1 000 kg/m³]

ρ_i puhtaan jään tiheys [= 917 kg/m³], jonka oletetaan riippuvan lämpötilasta

2.6 Jäämuodot

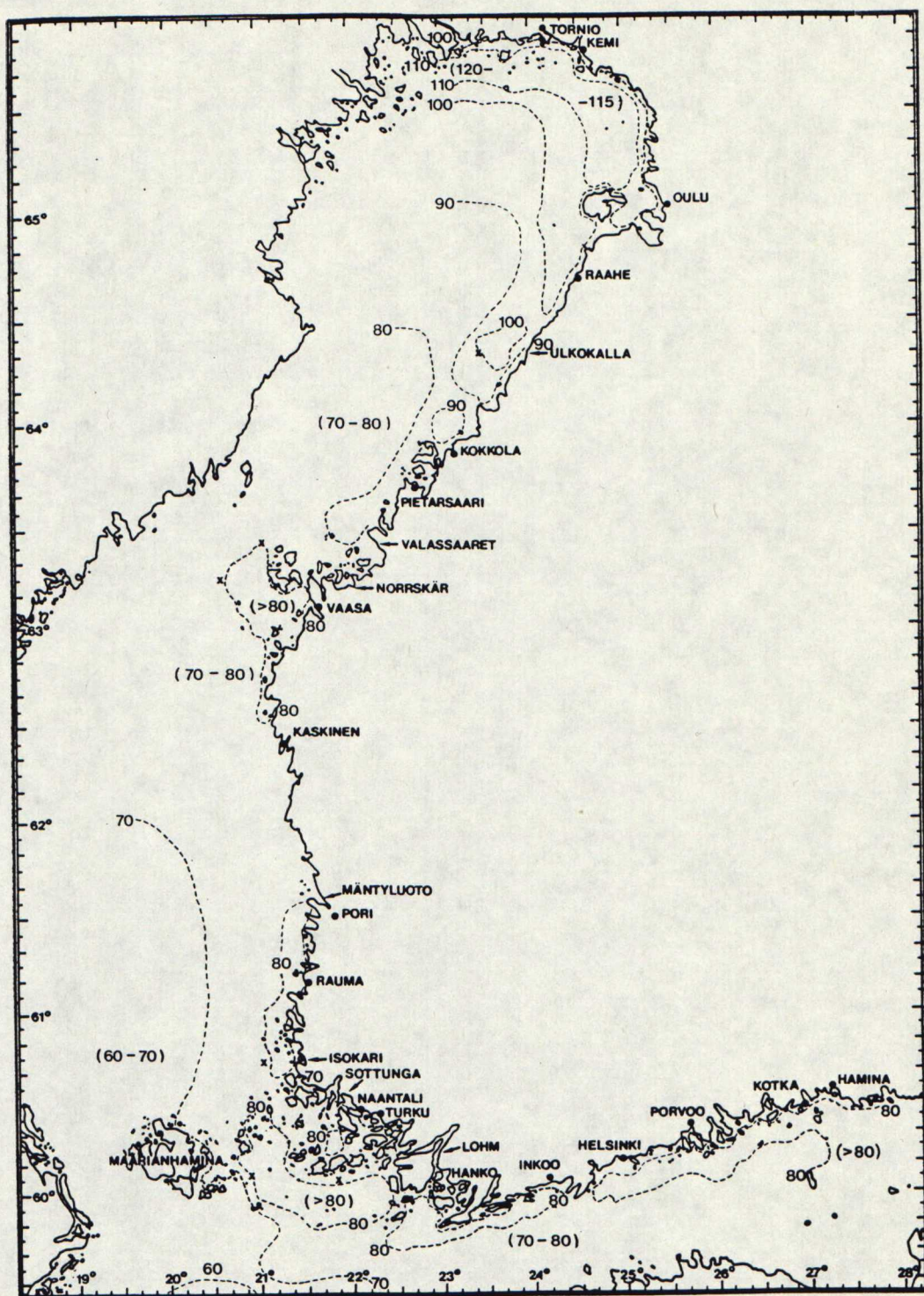
2.6.1 Tasainen ja murskautunut jää

Suomessa esiintyvät jäämuodot ovat tasainen jää, murskautunut jää ja yksivuotinen ahtojää. Tasainen jää muodostuu Suomen rannikolle joka talvi. Kapeisiin kohtiin kuten Merenkurkkuun ja Ahvenanmerelle saattaa muodostua jääsiltoja. Jopa Pohjanlahden kaltaiset laajat altaat ovat olleet liikkumattomia tyyninä, alhaisen lämpötilan jaksoina. Tasaisen jään vuosittainen maksimipaksuus merialueiden keskellä Pohjanlahdessa on 50...70 cm, Itämeressä 25...40 cm ja Suomenlahdessa 25...50 cm. Suurin mitattu jään paksuus on 115 cm Tornion edustalla. (ks. kuva 6) [10, s. 8]

Rannikon ulkopuolella jään paksuus vaihtelee huomattavasti paikan ja ajan mukaan, koska jää liikkuu ja sitä muodostuu jatkuvasti. Viime vuosina jään liikkuvuus on lisääntynyt jäänmurtajaväylien takia. Murskautunut jää syntyy tasaisen jään liikkuesssa ja synnyttäessä pieniä lohkareita, jotka muodostavat murskautuneen jään kentän. [10, s. 8]

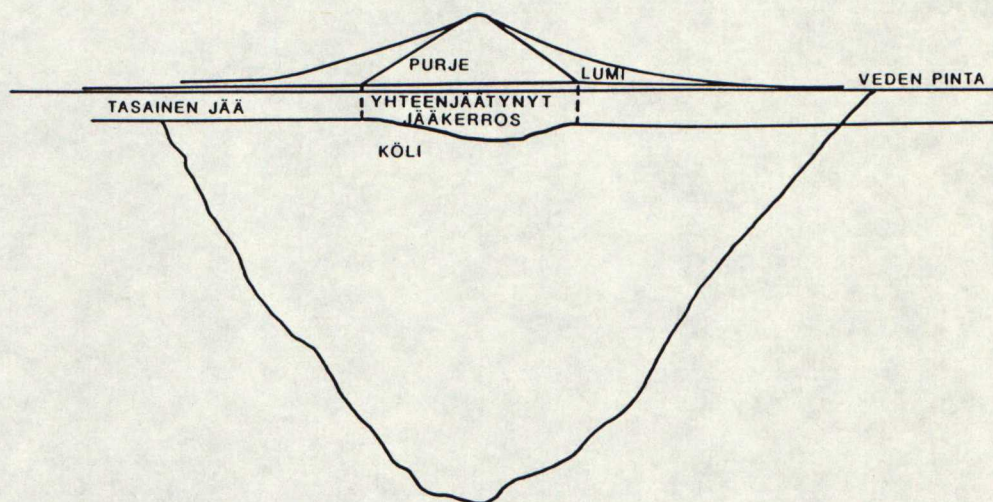
2.6.2 Ahtojäävalli

Ahtojäävalli on rikkoutuneesta jäästä muodostunut linja tai seinä, joka on kasautunut paineen ansiosta veden pinnan ylä- ja alapuolelle. Ahtojäävalli voi syntyä kahdella tavalla: kahden jääkentän kohtaamisen seurauksena tai niin, että paine yhden kentän sisällä johtaa valliumiseen. [11, s. 3]



Kuva 6. Tasaisen jään maksimipaksuus (cm) vuosina 1920-1980. [10, s. 6]

Ahtojäävallissa on kolme osaa. Purje on ahtojäävallin näkyvä osa ja se sisältää kaiken jään ja lumen tasaisen jään yläpuolella. Kölissä on kaikki tasaisen jään alapuolinen jää, lumi ja sohjo. Yhteenjäätynyt jääkerros sijaitsee kölön ja purjeen välissä. [11, s. 8] Kuvassa 7 on yksityiskohtainen poikkileikkaus ahtojäävallista mittoineen. Ahtojäävalli voi olla tuore tai rapautunut. Rapautumisella tarkoitetaan sulamisen aiheuttamaa jäälohkareiden pyöristymistä ja huokosten täyttymistä vallin näkyvässä yläosassa sekä vallin peittymistä lumella. [11, s. 3]



Kuva 7. Ahtojäävallin poikkileikkaus. [11, s. 21]

Pohjanlahdessa purje on yleensä muodostunut irtonaisista jäälohkareista, joiden paksuus on 0,2...0,4 m ja suurin pituus 3...5 kertaa paksuus. Purjeen korkeus on 30...200 cm, jään tiheys 870 kg/m^3 ja huokoisuus 36...43 % . Lohkareet purjeen yläosassa ovat satunnaisesti suuntautuneita, mutta lähellä tasaista jääkerrosta ne ovat vaakasuuntaisia tai vinosti suuntautuneita. Purje voi olla joko lumipeitteinen tai lumeton. Jos se on lumipeitteinen,

huokoset ovat myös suurimmalta osin lumen täyttämiä. Lumi kasaantuu purjeen molemmille puolin. [11, s. 14]

Yhteenjäätynyt jääkerros on yleensä samanpaksuinen (0,25 ...0,7 m) jäävallin molemmin puolin. Paksuus riippuu jäälohkareiden koosta, keskimääräinen ero tasaisen jään ja purjeen jäälohkareiden paksuuksilla on noin 0,2 m maaliskuun lopussa. Purjeen alla olevan yhteenjäätyneen jääkerroksen paksuus on 50...72 % suurempi kuin ympäröivän tasaisen jään maaliskuun lopussa. Jään tiheydeksi mitattiin 915 kg/m^3 . Suurin osa jäävallin suolaisesta jäästä on aivan jäätyneen jääkerroksen pinnassa. Yhteenjäätyneen jääkerroksen taivutuslujuus on huomattavasti pienempi kuin ympäröivän tasaisen jään. [11, s. 14]

Kölin syvyys on 5...7 -kertainen purjeeseen nähden. Suurin mitattu syvyys on 28 metriä. [12, s. 69] Kölissä jäälohkareiden paksuus, koko, tiheys ja huokoisuus ovat samat kuin purjeessa. Jäälohkareet ovat pyöristyneitä ja kuluneita. Lujuus alenee siirryttäessä kölissä alaspäin. Edustava lujuusarvo kölin jäälle on alle $2 \cdot 10^5 \text{ MN/m}^2$. Lohkareet ovat satunnaisesti suuntautuneet. Kölin sisältä voidaan olettaa löytyvän jonkin verran raelunta. [11, s. 15]

2.7 Jään murtomallit

2.7.1 Yleistä

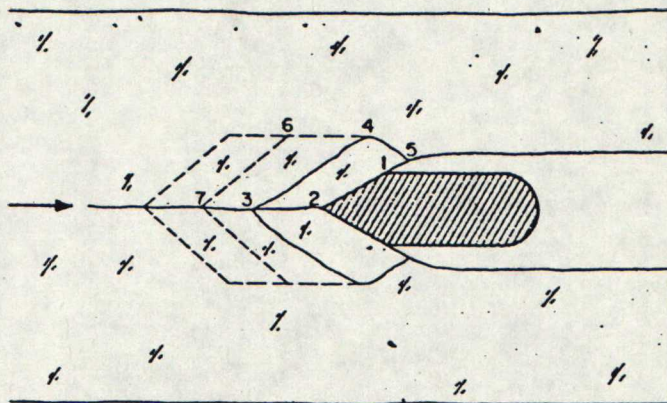
Jää voi murtua taipumalla, leikkautumalla, puristumalla tai lommahtamalla. Murtotapa määräytyy siitä, mikä jännitys saavuttaa kriittisen arvonsa ensin. Leikkausmurto on todennäköisin jäidenlähdön aikana, koska jään sulaminen alkaa kiderajoilta ja näin puikkojään kiteiden suuntainen leikkauslujuus pienenee sulamisen alussa muita lujuuksia nopeammin. Edellytykset jäälauttojen taivutusmurrolle ovat olemassa, kun jäidenlähtö tapahtuu ennen kuin kevät on vielä kovin pitkällä. Jäälautan puristusmurto on mah-

dollinen vain silloin, kun pystysuora kuormituskomponentti on pieni. [13, s. 120]

Jään leikkauskapasiteetti on murtomekanismin kannalta ratkaiseva tekijä. Jään leikkauslujuuden suunnitteluarvona on yleensä käytetty $0,5...1,1 \text{ MN/m}^2$. [13, s. 106] Esimerkiksi paalulle rakenteen ja jäälevyn välisen kontaktin sekä säätilan vaikutus kuormaan on olennainen, sen sijaan paalun muodon ja kuormitusnopeuden vaikutus kuormaan on vähäinen. [13, s. 133]

2.7.2 Taivutusmurto

Jää murtuu taipumalla, kun jäälautta törmää rakenteen kaltevaan pintaan. Korzhavinin mukaan taivutusmurto tapahtuu 3-6 -kertaisen jäänpaksuuden etäisyydellä rakenteesta. Korzhavin tarkasteli ongelmaa ideaaliplastisen laatan teorian perusteella ja oletti murtuman tapahtuvan etäisyydellä $3h$ pilarin sivuista (h = jään paksuus). [13, s. 122]



Kuva 8. Jäälaudan taivutusmurto. [13, s. 122]

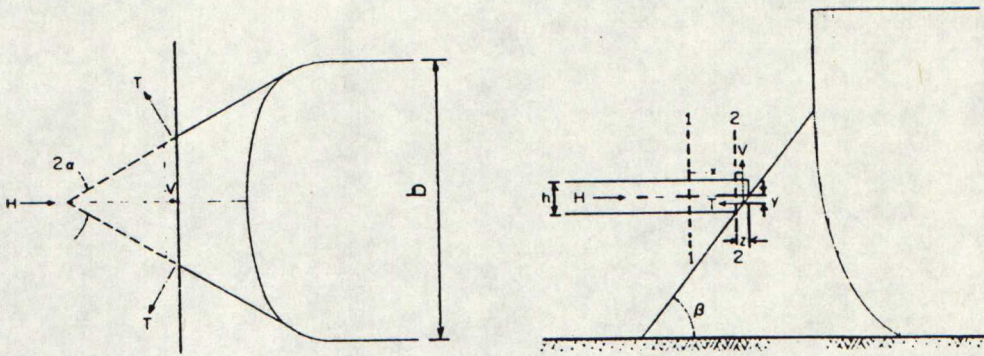
Jäälaudan törmätessä kaltevaan virtapilariin, laudan alanurkka murtuu kontaktikohdassa ja vaaka- ja pystyvoimat syntyvät. Kuorman kasvaessa syntyy kuvan 8 mukaisesti ainakin kolme säteittäishalkeamaa. Kuorma saavuttaa maksimiarvonsa, kun taivutushalkeama 3-4 murtaa

lohkareen irti jäälautasta. Tämän jälkeen kuorma pienee, kunnes syntyy uusi kontakti ja prosessi jatkuu. [13, s. 122]

Törmäysreaktio voidaan jakaa komponentteihin T ja V . (ks. kuva 9)

$$T = V \cot \beta$$

(9)



Kuva 9. Jäälautan ja etureunastaan kaltevan virtapilarin törmäys. [13, s. 119]

Dynaamiseksi kitkakertoimeksi oletetaan 0,1. Vaakavoimaksi H saadaan

$$H = 2 T \sin \alpha = 2,2 V \tan \beta$$

(10)

jossa 2α on kiilakulma (ks. kuva 9)

β rakenteen kaltevuuskulma vaakatasosta

Korzhavin ehdottaa voimien vaikutustasoksi $y = 0,25 h$.

Virtapilariin vaikuttaviksi kokonaisvoimiksi saadaan

$$H_{\max} = C_0 \sigma_t h b \tan \beta$$

(11)

$$V_{\max} = 0,9 C_0 \sigma_t h b$$

(12)

joissa C_0 on kerroin, joka saadaan taulukosta 1

σ_t jään taivutuslujuus
 h jään paksuus
 b rakenteen leveys

Taulukko 1. Kerroin C_0 kiilakulman 2α ja kaltevuuskulman β funktiona. (Korzhavin) [13, s. 124]							
β	2α	=	45°	60°	75°	90°	120°
45°			0,20	0,17	0,16	0,16	0,15
60°			0,24	0,20	0,19	0,18	0,17
70°			0,38	0,27	0,23	0,21	0,19
75°			0,79	0,38	0,29	0,26	0,22

Jään vetolujuus vaikuttaa taivutusmurtoon, koska taivutusmurto alkaa vetohalkeamalla. Pienillä muodonmuutosnopeuksilla (venymismurtuma) vetolujuus riippuu sekä muodonmuutosnopeudesta että raakoosta. Suuremmilla muodonmuutosnopeuksilla (haurasmurtuma) vetolujuus riippuu vain raakoosta. Lämpötilalla ei ole käytännön merkitystä vetolujuuteen. Vetolujuus saa suurimman arvonsa muodonmuutosnopeuksilla $10^{-6} \dots 10^{-5}$ 1/s (-10°C) ja se on noin 1,2 MPa, kun kidekoko on 5 mm. [4, s. 23]

2.7.3 Puristusmurto

Puristusmurto tapahtuu, kun jääkuori on kosketuksissa rakenteeseen ja jääkuori menettää kantokykynsä kosketuskohdassa vaikuttavien korkeiden puristusjännitysten vuoksi. [4, s. 24]

Muodonmuutosnopeuksilla $\dot{\epsilon} < 5,8 \cdot 10^{-4}$ 1/s murtuminen tapahtuu venymismurtumana ja se riippuu pääasiallisesti muodonmuutosnopeudesta ja kidekoosta.

$$\sigma_0 = 96 \dot{\epsilon} (d_s/d_g)^{1/2} \text{ [MPa]} \quad (13)$$

$$\dot{\epsilon} < 5,8 * 10^{-4} \text{ 1/s (myötö)}$$

Jään puristuslujuus riippuu lämpötilasta korkeilla kuormitusnopeuksilla jään käyttäytyessä hauraasti. [6, s. 16] Kun lämpötila laskee, jään murskautumislujuus kasvaa. Hauraalla alueella lämpötila vaikuttaa koheesion vuoksi murskautumislujuuteen enemmän kuin myötöalueella.

$$\sigma_{0\max} = 2,2 \{ (d_s/d_g)^{1/2} + 0,21 T^{0,78} \} \text{ [MPa]}$$

$$\dot{\epsilon} > 5,8 * 10^{-4} \text{ 1/s (hauras)} \quad (14)$$

jossa T on jään lämpötila [°C]

Murskautumislujuus saavuttaa suurimman arvonsa muodonmuutosnopeudella $10^{-4} \dots 10^{-3} \text{ 1/s}$ -10 °C. Korkeilla muodonmuutosnopeuksilla murskautumislujuus vähenee 5 MPa:iin, kun jää alkaa murtua hauraasti, ja vähenee edelleen 3 MPa:iin vielä korkeammilla muodonmuutosnopeuksilla. [4, s. 25] Kun huomioidaan jään lämpötila, raekoko ja erityisesti epähomogeenisuudet jääkuoressa, jään murskautumislujuus vaihtelee 1,4...2,8 MPa:iin. [4, s. 23]

2.7.4 Leikkausmurto

Leikkausmurron tapahtuessa jäälautan alapinta on murskautunut kuvan 9 mukaisesti.

Pystyvoima on [13, s. 121]

$$V_{\max} = (k b h \tau_0) / \sin \alpha \quad (15)$$

jossa k on kontaktikerroin taulukosta 2

- b rakenteen leveys
- h jään paksuus
- τ_0 jään leikkauslujuus
- α kiilakulman puolikas

Taulukko 2. Kontaktikertoimen k riippuvuus pilarin leveydestä ja jäälauttojen nopeudesta. [13, s. 113]

Pilarin leveys [m]	Jäälauttojen nopeus [m/s]		
	0,5	1,0	1,5
3-5	0,7	0,6	0,5
6-8	0,6	0,5	0,4

Pilarin akselin suuntainen vaakavoima on

$$H_{\max} = (1,1 k b h \tau_0 \tan \beta) / \sin \alpha \quad (16)$$

jossa β on kaltevuuskulma

Jos virtapilarin kalteva etureuna on puolilympyrän muotoinen, voimakomponentit ovat

$$V_{\max} = \pi/2 k b h \tau_0 \quad (17)$$

$$H_{\max} = 0,55 \pi k b h \tau_0 \tan \beta \quad (18)$$

2.7.5 Lommahdus

Jääkuori lommahtaa, kun puristusjännitykset jääkuoren tasossa ylittävät sen kimmoisen tasapainon. Lommahdus tapahtuu siis ohuiden jääkuorien ja laajojen rakenteiden yhteydessä. [4, s. 24]

3 YMPÄRISTÖOLOSUHTEET

3.1 Jääkenttien voimat

3.1.1 Yleistä

Jäälauttaan ja ajojääkenttään vaikuttavia ulkoisia voimia ovat: ilman ja veden virtauksen kitkavoimat, viereisten jäälauttojen aiheuttamat voimat sekä coriolisvoima, joista viimeksi mainittu on käytännössä merkityksetön.

3.1.2 Tuuli ja veden virtaus

Tärkein ajojäätä kuljettava voima on tuulen paine. Tuuli ja virtaukset kuljettavat ajojäätä, joka on herkästi liikkuva, koska avopaikkojen jäätyminen on hidasta tai sitä ei tapahdu ollenkaan. Suurin mitattu jään ajelehtimisnopeus Pohjanlahdessa on 60 cm/s. Tuulen nopeus ja suunta sekä jään yläpinnan epätasaisuus määräävät tuulen vaikutuksen jään liikkeisiin. Lounas on vallitseva tuulen suunta Itämerellä maalisi-toukokuussa. Pohjoistuulet ovat myös yleisiä. [5, s. 8]

Jos jään sisäiset muodonmuutokset jätetään huomiotta, jääkentän tai -lautan liikeyhtälö voidaan esittää muodossa [14, s. 1]

$$m \frac{dv}{dt} = F_i + F_v \quad (19)$$

jossa m on jään massa pinta-alayksikköä kohti

$\frac{dv}{dt}$ jään liiketilan muutos

F_i jään ja ilman välinen kitkavoima pinta-alayksikköä kohti

F_v jään ja veden välinen kitkavoima pinta-alayksikköä kohti

Veden virtauksen vaikutus jäähän riippuu sen nopeudesta ja suunnasta sekä jään alapinnan muodoista. Ilman tai

veden jäähän aiheuttamat kitkavoimat voidaan laskea kaavoilla [3, s. 5.19]

$$\tau = \rho c(z) \{v(z)\}^2 \quad (20)$$

$$c(z) = k^2 \{\ln[(z + z_0)/z_0]\}^{-2} \quad (21)$$

joissa ρ on ilman tai veden tiheys [kg/m^3]

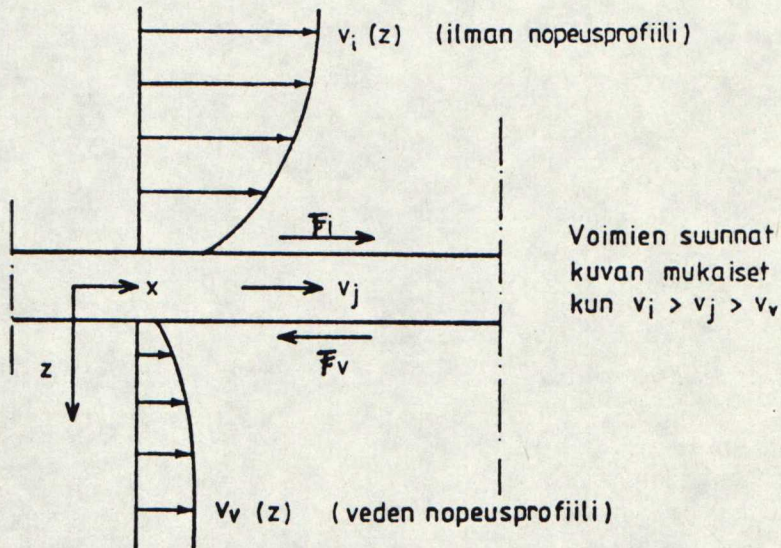
$c(z)$ pintakitkan kerroin, joka liittyy virtausnopeuden mittauskohdan etäisyyteen z jään pinnasta

$v(z)$ ilman tai veden virtausnopeus etäisyydellä z jään pinnasta [m/s]

k Karmanin vakio, oletusarvo on 0,4

z mittauskohdan etäisyys jään pinnasta [m]

z_0 rajapinnan karkeutta kuvaava mitta [cm]
taulukosta 3



Kuva 10. Jäälautan kitkavoimat. [15, s. 14]

Kaavalla (20) voidaan arvioida esimerkiksi kokonaisvoimaa, joka jääkentästä kohdistuu rantaan tai ajelehtivan

jäälautan nopeus, kun vallitsevat ilman tai veden virtausnopeudet tunnetaan. [14, s. 2]

Taulukko 3. Mitattuja kertoimen z_0 arvoja. [14, s.2]	
Pinta	z_0 [cm]
Rikkonainen jää	0,23 - 0,57
Lumipeite	0,0023 - 0,285
Tasainen jää	0,0017 - 0,03
Röykkiöitynyt jää	0,0011 - 0,32
Sohjolumen peittämä jää	0,0036 - 0,33
Hyvin karkea	8,1 - 10,0
Karkea	1,5 - 4,7
Sileä	0,2 - 1,4

Tuulen ja merivirran jäähän aiheuttama voima voidaan myös laskea kaavalla [6, s. 23]

$$F = C_D q A \quad (22)$$

jossa C_D on vastuskerroin

$C_{Da} = 0,002 \dots 0,005 \dots 0,01$ jää/ilmalle

$C_{Dw} = 0,01 \dots 0,04 \dots 0,1$ jää/vedelle

(minimi...ohje...maksimi)

q on liikenopeudesta johtuva paine

$$q = 1/2 \rho U^2 \quad [\text{Pa}]$$

ρ jään tai veden tiheys $[\text{kg/m}^3]$

U ilman nopeus 10 m tasolla tai veden nopeus -0,5 m jään alapinnasta $[\text{m/s}]$

A ajavien voimien vaikutuspiirissä olevan jääkentän pinta-ala $[\text{m}^2]$

Esimerkiksi: $C_{0a} = 0,01$ (karkea pinta)
 $\rho = 1,0 \text{ kg/m}^3$
 $U = 15 \text{ m/s}$
 $q = 1/2 * 1.0 \text{ kg/m}^3 * (15 \text{ m/s})^2 = 112.5 \text{ N/m}^2$
 $A = 10 \text{ km}^2 = 1,0 * 10^6 \text{ m}^2$

$$\Rightarrow F = 0,01 * 112,5 \text{ N/m}^2 * 10^6 \text{ m}^2 = 1,1 \text{ MN}$$

Suurimman murtuvan jään paksuuden h_0 ja tuulen nopeuden w välinen riippuvuus saadaan kaavalla [10, s. 8]

$$h_0 = \alpha w \quad (23)$$

Kerroin α on ei-lineaarinen funktio saarien ja matalikkojen välisestä etäisyydestä, joilla kariutuneita ahtojäävalleja esiintyy. [10, s. 16]

Suurin odotettavissa oleva tuulen nopeus lasketaan Rayleigh'n jakaumalla [10, s. 17]

$$w_T = \bar{w} [4/\pi \log T]^{1/2} \quad (24)$$

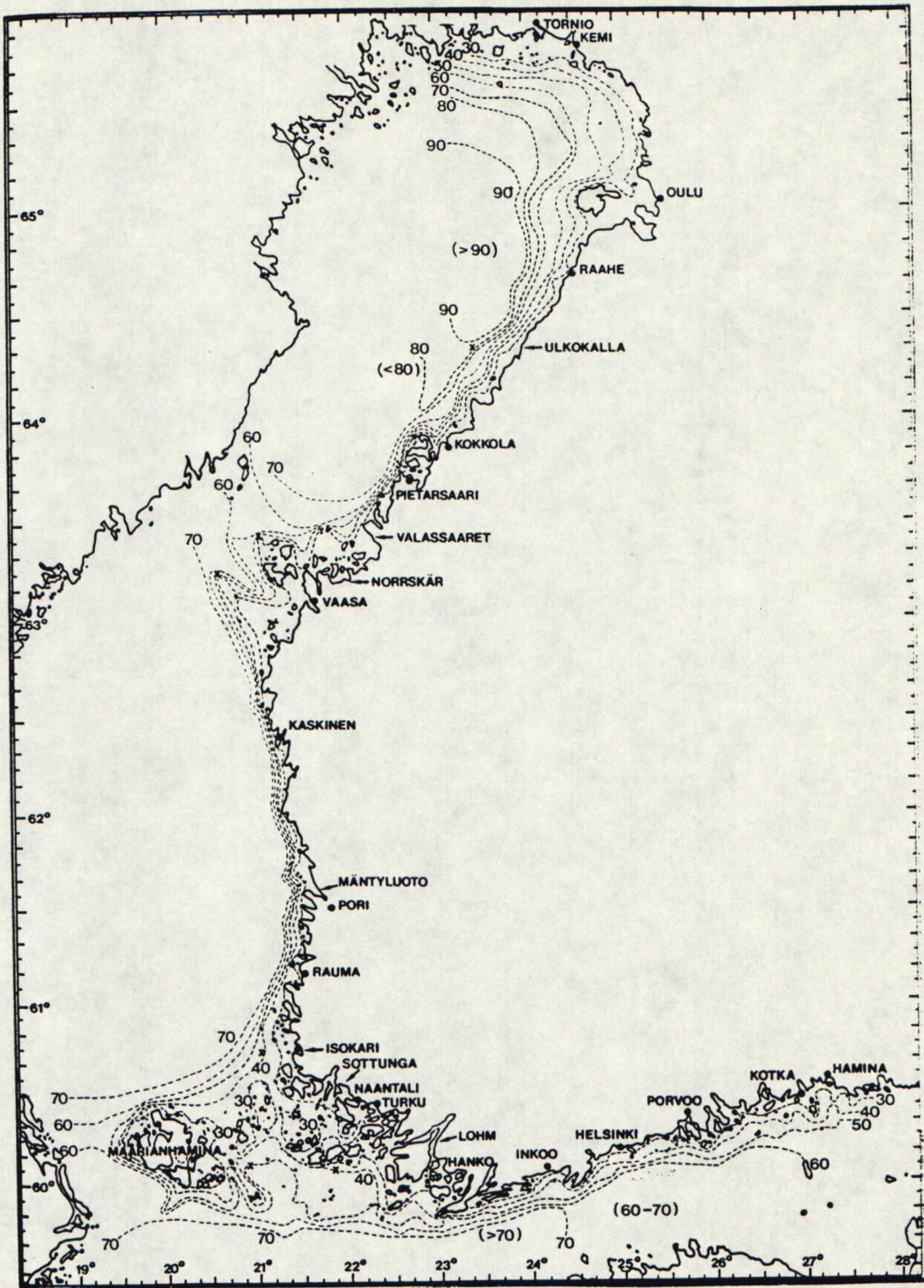
jossa w_T on suurin odotettavissa oleva tuulen nopeus T :n päivän aikana
 \bar{w} tuulen nopeuden keskiarvo

Liikkuvan jään suurin mahdollinen paksuus on [10, s. 17]

$$h^{(n)} = \alpha \bar{w} [4/\pi \log(n \Delta T)]^{1/2} \quad (25)$$

jossa $h^{(n)}$ on suurin odotettavissa oleva jään paksuus n :n vuoden aikana
 ΔT ajanjakson pituus, jolloin jää liikkuu

Suurin odotettavissa oleva liikkuvan jään paksuus Suomen rannikolla on esitetty kuvassa 11.



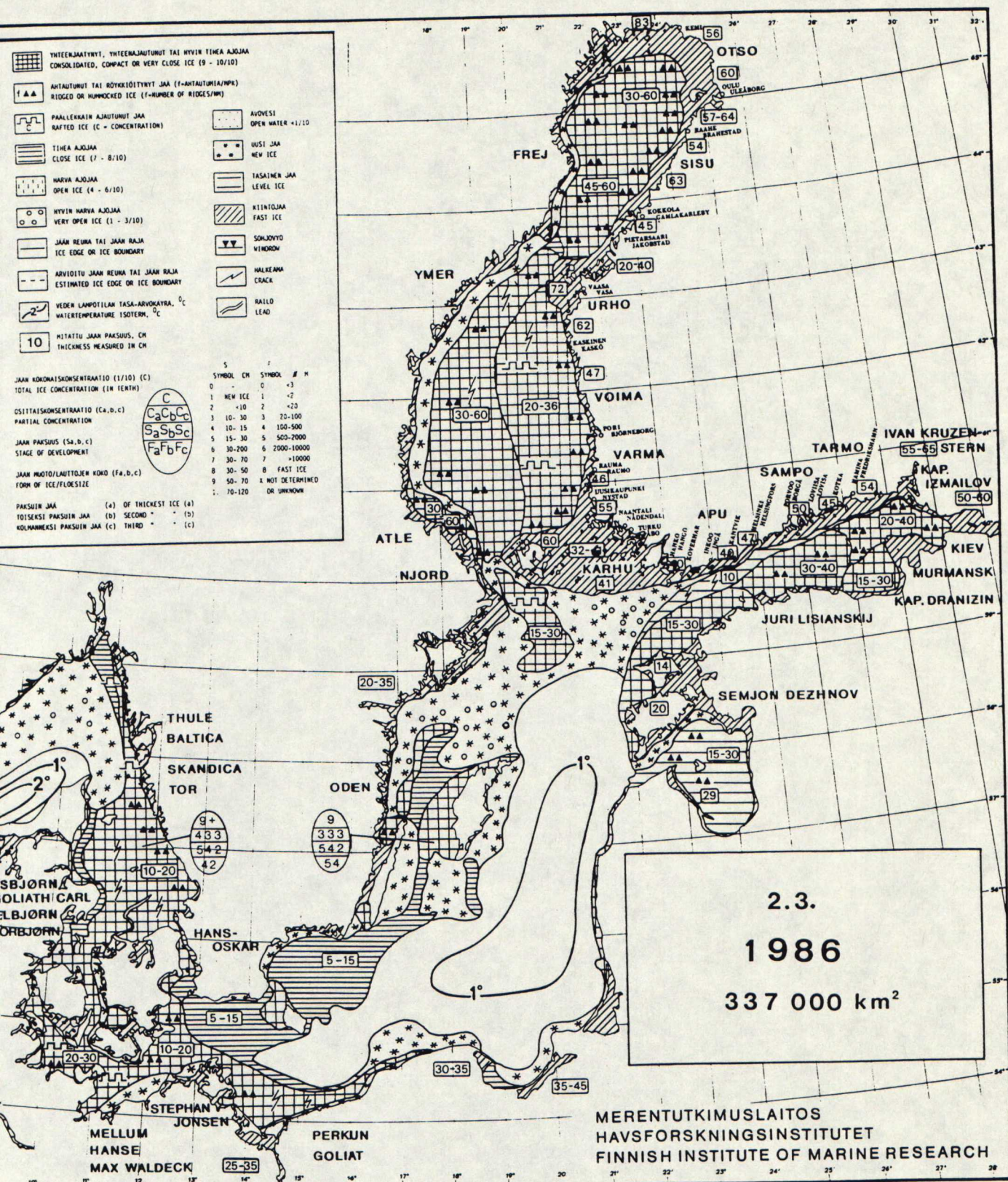
Kuva 11. Suurin odotettavissa oleva liikkuvan jään pak-
suus 30 vuoden aikana Suomen rannikolla. [10, s. 18]

3.2 Jääkartat ja jäätilastot

Jäättilannetta Suomen rannikolla havainnoidaan päivittäin noin 35 mittauspisteessä, jotka sijaitsevat yleensä talvisatamien läheisyydessä. Jään paksuus mitataan kerran viikossa. Tulokset lähetetään merentutkimuslaitoksen jääpalvelulle viikottain. Jäänmurtaajat ilmoittavat jäätilanteesta reittinsä varrella jääpalvelulle telexillä kolmesti päivässä.

Jääpalvelun toiminnan painopistealueina ovat kaukokartoitus ja jään mallintaminen. Kaukokartoitus perustuu kolmen satelliitin Itämeren alueesta lähettämiin kuviin. Satelliittikuvista voidaan havainnoida jään pinnanmuotoja, avopaikkoja ja railoja, mutta niistä ei saada jään paksuutta. Jään mallintamisella tarkoitetaan tietystä lähtötilanteesta tapahtuvaa seuraavien päivien jäätilanteen ennustamista. (Grönvall 25.8.92)

Jääpalvelutoimisto julkaisee myös tilastoaineistoa jääolosuhteista. Se tekee joka viides vuosi julkaisun: Jäätalven kesto aika ja kiintojään paksuustilastoja ja joka 30. vuosi julkaisun: Jäätalvet Suomen merialueilla. Julkaisuissa on selostuksia jäätalvista, karttoja jään ulottuvuudesta, tilastoja jäätymisen ja jäänlähdon ajankohdista. jääpäivien lukumääristä, jääpeitteen laajuudesta eri satamien edustoilla sekä jää- ja lumipeitteen paksuudesta. (ks. kuva 12 ja taulukko 4)



Kuva 12. Jään laajin ulottuvuus 1985/86. [16, s. 4]

Taulukko 4. Jää- ja lumipeitteen paksuudet cm:ssä talvella 1985/86. [16, s. 38]

Selitykset: H = jään kokonaispaksuus, h = lumijään määrä, s = lumen paksuus, x = ei mittausta

Päivämäärä		Helsinki	Glosholm			Orrengrund			Loviisa			Kotka			Haapasaari		
Date		H	H	h	s	H	h	s	H	h	s	H	h	s	H	h	s
1985	X	5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
		12	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
		19	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
		26	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	XII	3	x	-	-	-	-	-	4	-	3	-	-	-	-	-	-
		10	x	-	-	-	-	-	8	-	5	-	-	-	-	-	-
		17	x	-	-	-	-	-	11	-	3	5-15	-	-	-	-	-
		24	8	-	-	-	-	-	13	-	-	-	-	-	-	-	-
		31	9	x	-	2	-	-	16	-	4	5-15	-	-	-	-	-
			x	-	x	x	-	-	20	-	16	x	-	x	-	-	-
1986	I	7	10	x	-	x	-	-	20	-	16	x	-	x	-	-	-
		14	12	10-20	-	0-10	x	x	23	-	16	5-25	-	x	17	-	-
		21	14	30	-	0-10	x	x	26	-	18	10-	-	x	32	-	5
		28	16	30	-	15	x	x	26	-	6	30	-	1-5	34	2	5
	II	4	18	33	-	3	30	25	7	33	5	3	10-	3	39	2	5
		11	21	40	10	5	38	30	7	39	9	3	35	-	5	42	2
		18	24	40	-	10	39	30	5	40	9	3	30	-	6	47	2
		25	27	45	-	7	41	30	5	43	9	3	32	-	7	50	2
	III	4	32	45	-	20	45	30	7	44	9	4	39	-	12	54	2
		11	37	45	-	3	45	30	3	43	9	1	45	-	15	57	-
		18	40	45	-	7	52	37	7	42	9	1	45	-	10	60	2
		25	39	45	25	10	52	37	3	40	9	-	45	-	10	x	x
	IV	1	37	40	30	-	50	35	-	37	9	-	45	-	-	x	x
		8	34	35	35	-	40	35	-	34	8	-	45	6	-	50	5
		15	31	35	35	-	35	30	-	32	8	-	45	10	-	50	5
		22	20	30	30	-	20	20	-	20	20	-	46	15	-	25	15
		29	-	-	-	-	10	10	-	-	-	-	45	-	-	15	15
	V	6	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	30	-	-	-	-
		13	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
		20	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

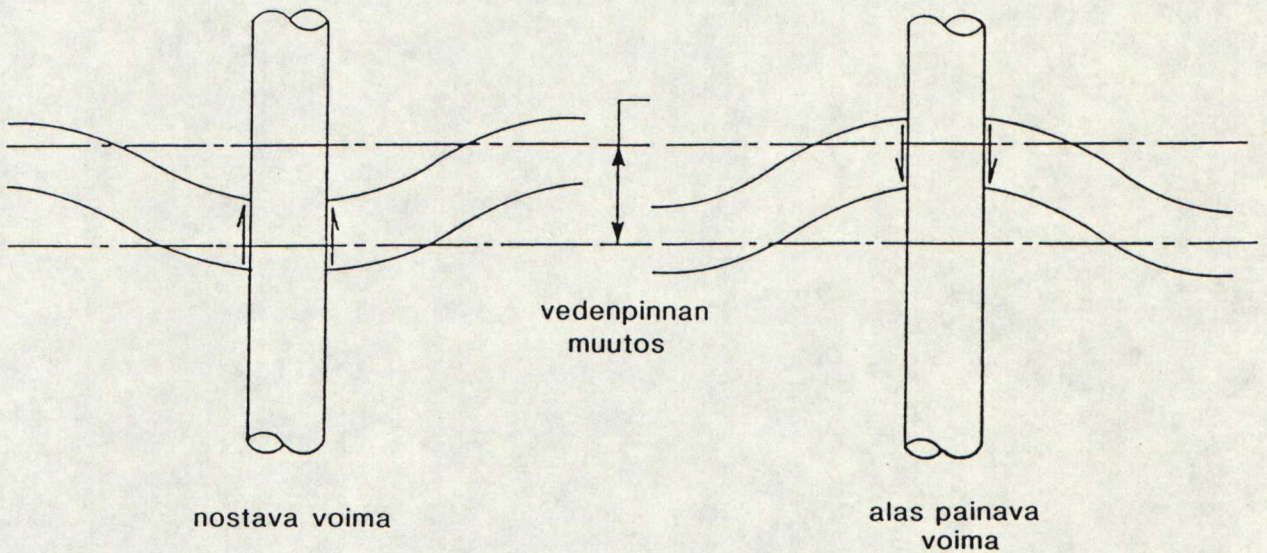
3.3 Vedenkorkeuden vaihtelut

Itämeren yllä puhaltavat tuulet aiheuttavat veden liikkettä. Maalis-huhtikuussa päivittäinen vedenpinnan vaihtelu on keskimäärin 15,4 cm. Suurimmillaan vedenpinnan vaihtelu on Kemissä (0,65 m). [5, s. 9]

Vedenpinnan noustessa tai laskiessa rakenteisiin kiinnittynyt jää kuormittaa rakenteita omalla painollaan tai veden nosteen vaikutuksesta. Näille kuormille ovat alttiita kasuunit, kanava- ja allasrakenteet sekä erityi-

sesti keveät rakenteet, kuten rantalaitureiden ja pistolaitureiden paalut. (ks. kuva 13) [4, s. 29] [13, s. 93]

Pystysuorista jääkuormista saadaan lähinnä todellisia tuloksia, kun huomioidaan jään viskoelastiset ominaisuudet. Tiedot eri jäätyyppien virumisominaisuuksista taivutusrasituksen alaisena ovat kuitenkin vielä riittämättömiä. Tämän takia vedenkorkeusvaihteluiden aiheuttamia kuormia arvioidaan vielä kimmo- ja plastisuusteorian pohjalta. [13, s. 94]



Kuva 13. Rakenteeseen vedenpinnan vaihdellessa aiheutuvat nostava ja alas vetävä voima. [4, s. 30]

4 SUOMESSA TEHDYT JÄÄTUTKIMUKSET VUOSINA 1970-90

4.1 Yleistä

Jään ja rakenteiden vuorovaikutuksen tutkimiseen on Suomessa käytetty julkista rahoitusta n. 10 miljoonaa markkaa. Summaan ei ole laskettu mukaan laivakokeita. Tutkimustulokset ovat hajallaan, koska osa niistä on tehty eri toimeksiannoista, eikä niitä tästä syystä ole julkaistu missään sarjajulkaisussa. (Määttänen 28.8.92)

Jäätutkimuksen ongelmana on, etteivät insinöörien ja tutkijoiden ajatusmaailmat kohtaa. Jääasioissa on kaksi eri tasoa: teoreettinen ja insinööritaso. Insinööri, joka näkee käytännössä tutkimusta kaipaavat asiat, ei pääse vaikuttamaan tutkimuskohteisiin. Tutkimuksen ydinkohtia ovat: mitä kannattaa selvittää ja miten se tehdään. (Eranti 18.8.1992)

Koska jään käyttäytymistä ei ymmärretä, ei osata laskea värähtelyjä. Tämän takia rakenteet usein yli- tai alimitoitetaan tai tehdään vääränlaisia rakenteita.

Mallijään käyttö kokeissa tuo myös usein mukanaan ongelmia. Mallijäitä on olemassa useita, toisilla saadaan parempia tuloksia kuin toisilla. Laboratorio-olosuhteissa käytetään homogeenista mallijäätä, sillä kokeet on pystyttävä toistamaan täysin samanlaisina kerrasta toiseen. Mallijäät ovat herkkiä ajalle, kokeet on tehtävä tietyn ajan sisällä, ettei materiaali muutu. On olemassa myös keinojäitä, jotka voivat olla esimerkiksi muovipohjaisia, mutta niiden huono puoli on, ettei niillä voi tutkia termisiä ominaisuuksia. (Hepojoki 21.9.1992)

4.2 Valtion teknillinen tutkimuskeskus

Valtion teknillisessä tutkimuskeskuksessa panostettiin 1980-luvulla arktiseen tutkimukseen, koska haluttiin päästä mukaan hyödyntämään arktisia luonnonvaroja. Arktisella tutkimuksella tarkoitetaan kaikkea tutkimusta, joka

tähtää toimintamahdollisuuksien parantamiseen Pohjoisen Jäämeren ja sen ympäristön alueella. [17] Öljyn hinnan romahduksen jälkeen ei öljyn ja kaasun etsiminen arktisilta alueilta ole ollut enää kannattavaa.

Lieriönmuotoisen betonimajakan ympärillä vaikuttavia jännityksiä mitattiin kenttäkokeissa, jotka tehtiin Pohjanlahdessa keväällä 1984. Jännitykset mitattiin antureilla viidestä pisteestä majakan ympärillä ja niistä laskettiin majakkaan kohdistuvat jääkuormat. [18]

Valtion teknillisen tutkimuskeskuksen laivalaboratorio ja teknillisen korkeakoulun arktisen meritekniikan tutkimuskeskus tekivät yhteistyössä jään 4-pistetaivutuskokeita Suomenlahdessa Porkkalan lähellä talvella 1985. [19]

Kymmeneen reunamerkkiin ja majakkaan Suomen rannikolla kiinnitettiin vuosina 1986-1989 mittauslaitteet VTT:n rakennetekniikan laboratorion toimesta. Automaattisella tiedonkeruujärjestelmällä tallennettiin useita jään ja rakenteen vuorovaikutustapahtumia. Tutkimuksessa mitattiin jännityksiä ja rakenteen kiihtyvyyksiä, joista suurimmat olivat jopa 60 m/s^2 . Jään avomerirakenteeseen aiheuttamia värähtelyjä simuloivia malleja kehitettiin myös. Hankkeessa olivat lisäksi mukana merenkulkuhallitus ja Tekes. [20]

VTT:n rakennetekniikan laboratoriolla ja teknillisen korkeakoulun arktisen meritekniikan tutkimuskeskuksella on ollut yhteisprojekti jään ja rakenteen dynaamisen vuorovaikutuksen tutkimisessa. Tunkeutumiskokeet tehtiin VTT:n jääaltaassa paksulla makean veden jäällä vuosina 1989 ja 1990. Kokeissa vaihdeltiin tunkeutujan muotoa, kaltevuutta ja nopeutta jään paksuutta sekä rakenteen ominaistaajuutta. Mitattuja suureita olivat voimat, siirtymät, kiihtyvyydet, jännitykset ja paikalliset paineet. [21, 22, 23, 24]

VTT on tehnyt WARCin (=Wärtsilä Arctic Research Centre) jääaltaassa kokeita, joissa jäätä joko työnnettiin mallia vasten tai mallia työnnettiin jäätä vasten. Jäättyypit olivat tasainen jää, jäävalli ja jäälohkareet. Rakennetyyppejä oli neljä: kartio, kasuuni, lieriö ja särmiö. [25]

4.3 Teknillinen korkeakoulu

Teknillisen korkeakoulun laivarakennuslaboratoriolla on 40 m * 40 m jääallas, jossa voidaan tehdä jääkokeita mallijäällä. Maailmalla on ollut käytössä useita eri mallijäitä, jotka eivät kuitenkaan riittävän tarkasti simuloineet merijään fysikaalisia ominaisuuksia. Kunnollisen mallijään kehittämiseksi tehtiin kokeita ja päädyttiin raemallijäähän, joka perustui 0,50 % etanoliliuokseen. [26] Koska alkuperäinen mallijäälaitteisto ei toiminut, jääaltaaseen hankittiin Kvaernerin vanha laitteisto ja lisenssit jään tuottamiselle.

Vesirakennuslaboratoriossa tehtiin merenkulkuhallituksen tilauksesta v. 1979 diplomityö, jossa pyrittiin kehittämään uusi jääpoijutyyppi ja siihen sopiva ankkurointitapa. Tulokseksi saatiin m.m. että jään tartuntalujuus muoviin on murto-osa käsittelemättömään teräkseen verrattuna. Esijännitetyn poijun havaittiin uivan kaikissa tilanteissa melko pystyssä ja se nousi myös kelluvia poijuja tehokkaammin jään alta. Tutkimuksessa päädyttiin suosittelemaan esijännitettyä muovipoijua. Ankkuroinnissa katsottiin kalliopultin soveltuvan parhaiten olosuhteisiin, joissa kallio on riittävän lähellä. Pehmeiköille suositeltiin mahdollisesti paalukiinnitystä. [27]

Teknillisen korkeakoulun vesirakennuslaboratorio on tutkinut Kemijärven säännöstelyn yhteydessä jääpatojen syntyä jokiin heikennetyllä luonnonjäällä ja jään alapuolisten virtausten merkitystä virtaushäviöihin.

Teknillisen korkeakoulun arktisen meritekniikan tutkimuskeskuksella on ollut useita yhteistyöhankkeita valtion teknillisen tutkimuskeskuksen kanssa. (ks. kohta 4.2)

4.4 Oulun yliopisto

Oulun yliopiston konetekniikan osastolla on ollut 1970-luvulla yhteistyöprojekteja merenkulkuhallituksen kanssa jään reunamerkkeihin aiheuttamien kuormien selvittämiseksi. Mittauksia varten suunniteltiin telemetrialaitteisto ja automaattisia itseherätteisiä rekisteröintilaitteita. Tutkimuksessa selvitettiin myös jään taivutuslujuuteen vaikuttavia parametreja. [17, s. 18]

Oulun yliopiston konetekniikan osastolla on ollut v. 1983-1986 yhteisprojekti 12 suomalaisen yrityksen kanssa, jonka tarkoituksena oli tutkia jääkuormia kartiomaista rakennetta vasten. Kokeet tehtiin Kemi 1 -majakalla, joka ympäröitiin koekartiolla. Hankkeen rahoituksesta lähes puolet saatiin Teknologian kehittämiskeskuksen välityksellä kauppa- ja teollisuusministeriöltä. [28, 29]

4.5 Merenkulkuhallitus

Merenkulkuhallitus on kiinnittänyt vesirakenteisiin piirureita, jotka mittaavat jään painetta rakennetta vasten. Esim. Sandbäckin linjataulussa ja Kristiinan kaupungin majakassa on tällainen piirturi. Mittareita luetaan keskimäärin kerran vuodessa. (Martonen 28.8.92)

Merenkulkuhallitus teetti Suunnittelukortes Oy:llä talvella 1972 jään kuormituskokeita Oulu-Kemi -syväväylää varten. Kokeissa pyrittiin selvittämään jään lujuus väylän reunamerkkien suunnittelua varten. Avantoon sijoitettiin hydraulinen puristin, jonka puristinkappale tukeutui avannon toiseen reunaan ja vastakappale toiseen. Näin pyrittiin simuloimaan tilannetta, jolloin tuuli painaa jääkenttää pilaria vasten. [30]

Merenkulkuhallituksessa tehtiin v. 1980 tutkimus, jossa muovipoijujen annettiin jäätyä avantoon, jonka jälkeen ne kiskottiin irti vakionopeudella. Tartuntalujuus saatiin mittaamalla irrottamiseen tarvittava voima. Kokeissa seurattiin myös koepoijujen käyttäytymistä ja kestävyyttä jäissä. [31]

4.6 Merentutkimuslaitos

Merentutkimuslaitoksen toimesta on sukeltajatutkimuksin selvitetty ahtojäävallien vedenalaisia telejä, niiden kokoa ja kiinnittymistä toisiinsa. [32, s. 4] Tämä on vieläkin käyttökelpoinen tapa tutkia ahtojäävalleja.

Itämeren jään pinnanmuotoja tutkittiin maaliskuussa 1988 helikopteriin kiinnitetyllä laserilla. Keskimääräiseksi vallin korkeudeksi saatiin 65-71 cm, suurin mitattu arvo oli 198 cm. Jäävallien lukumäärä oli 0,5-3,9 /km. [33] Itämeren ahtojäävalleja tutkittiin myös kenttämittauksin, ja ilmakuvien avulla. Tutkimuksessa kokeiltiin myös sellaisen tutkan käyttöä ahtojäävallien tunnistamisessa ja luokittelussa, jossa on synteettinen aukko. Kokeissa tutkittiin myös miten hyvin digitaalinen ilmakuva vastaa kenttämittausten tuloksia. [34]

Merentutkimuslaitos on tutkinut jään pystysuoria tiheyksiä jäänmurtaajien Urho ja Sisu kylkiin kiinnitetyn laserkameran avulla. Kamera mittasi jään korkeuden muutosta. Kokeen heikkoutena oli, ettei se antanut edustavaa arvoa jään korkeuden muutoksesta, koska jäänmurtaja ei kulkenut suoraa mittalinjaa vaan kulun kannalta helpointa reittiä, joka kiemurteli. (Grönvall 25.8.1991)

4.7 Teknologian kehittämiskeskus

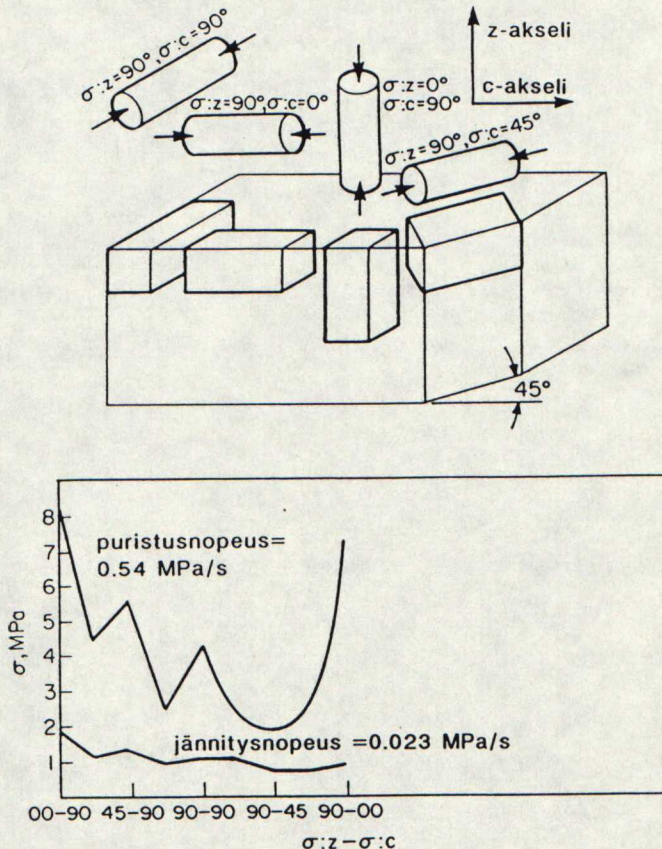
Teknologian kehittämiskeskus aloitti v. 1985 viisivuotisen teknologiaohjelman, jonka tarkoituksena oli parantaa Suomen kilpailukykyä arktisten luonnonvarojen (öljyn ja maakaasun) käyttöön otossa. Tekes antoi jäätutkimukseen 32

miljoonaa markkaa. Kun öljyn hinta romahti v. 1986, arktisen projektin painopiste siirtyi tutkimukseen.

5 AVOMERIRAKENTEIDEN JÄÄKUORMAT

5.1 Yleistä

Jään käyttäytyminen kuormitettuna eli jään lujuus riippuu jään lämpötilasta, kidekoosta, kiderakenteesta, suolaisuudesta, epäpuhtauksista, muodonmuutosnopeudesta, jännityksen alaisesta tilavuudesta, kuormituksen suunnasta kiderakenteeseen nähden ja kuormituksen tyypistä. [3, s. 3.1] [4, s. 7 & 25] Kiteen sivuakselien tasossa jää vääntyy ja murtuu helposti leikkausjännityksen alaisena, muissa suunnissa jää kestää paljon suurempaa kuormitusta. [3, s. 3.1] Jään lujuus eri suunnissa on esitetty kuvassa 14.



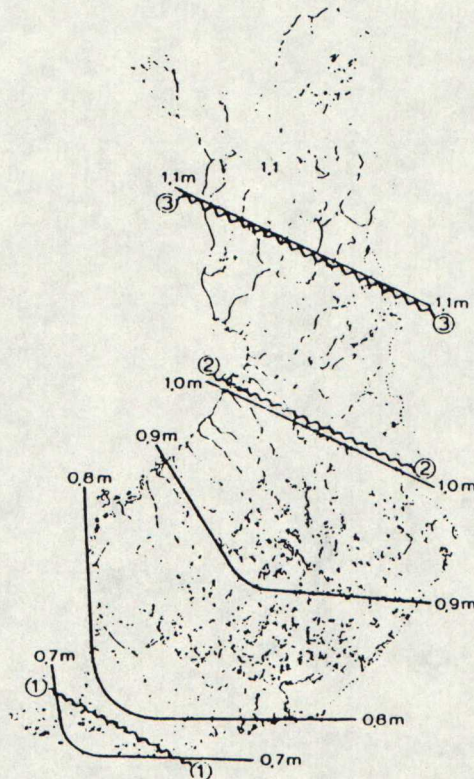
Kuva 14. Jään lujuus eri suunnissa. (Peyton, 1966)
[35, s. 73]

Jään kautta rakenteisiin välittyvät voimat ovat ympäristön aiheuttamia esim. tuulen ja virtauksien. Näistä voidaan määrittää suurin mahdollinen jääkuorma. Yleensä jään rikkoutuminen kuitenkin alentaa jään aiheuttamaa kuormitusta. [36, s. 59]

5.2 Tasaisen jään aiheuttamat kuormat

5.2.1 Kuormitusohjeet [37]

Rakenteiden kuormitusohjeissa jääkuormia määritettäessä otetaan huomioon jään paksuus, lujuus ja sen liikkeet. Kiinteän jääpeitteen paksuus määritetään joko tilastomaatemaattisesti vähintään 10 jäätalven havainnoista tai jos riittäviä havaintotietoja ei ole saatavissa, käytetään kuvasta 15 saatavia laskennollisia maksimipaksuuksia. Vaakasuorien jääkuormien vaikutustason oletetaan olevan syvyydellä $h/3$ jään yläpinnasta, h on jään paksuus.



Kuva 15. Kiinteän jääpeitteen laskennallinen maksimipaksuus (m). Käyrät 1, 2 ja 3 osoittavat rajat, joilla kuvan 16 jäänpainearvot ovat voimassa. Väliarvot interpoloidaan suoraviivaisesti. [37, s. 56]

5.2.1.1 Pysähtynyt jääkenttä tai jäälautta [37, s. 56]

Rakennetta vasten pysähtyneen jääkentän tai jäälautan rakenteeseen aiheuttama kuorma P lasketaan kaavalla

$$P = P_1 + P_2 + P_3 + P_4 + P_5 \quad (26)$$

jossa P_1 on tuulen aiheuttama jään pinnan suuntainen tuulikuorma

$$P_1 = \mu_1 q_k A$$

μ_1 on pinnan karkeudesta riippuva kerroin, saadaan taulukosta 5

q_k tuulenpaine

A jääkentän tai -lautan pinta-ala

P_2 on veden virtauksen suuntainen kuorma lautan alapintaan

$$P_2 = \mu_1 A p$$

μ_1 on pinnan karkeudesta riippuva kerroin, saadaan taulukosta 5

A rakenteen projektiopinta-ala virtausta vastaan kohtisuoralle tasolle

p virtaavan veden aiheuttama paine

$$p = \frac{\gamma_w v^2}{2 g}$$

γ_w on veden tilavuuspaino

v veden virtausnopeus

g maan vetovoiman kiihtyvyys

P_3 on lautan painon vaakasuora komponentti

$$P_3 = G i$$

G on jääkentän tai jäälautan paino

i vedenpinnan kaltevuus (1 : n)

P_4 on lautan reunaan vaikuttava virtauskuorma

$$P_4 = \mu_k A p$$

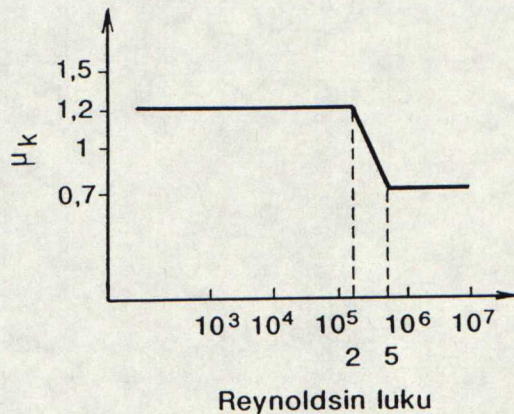
μ_k on hydrodynaaminen muotokerroin (kuvasta 16)

A rakenteen projektiopinta-ala virtausta vastaan kohtisuoralle tasolle

p virtaavan veden aiheuttama paine

P_5 on lautan reunaan vaikuttava aaltokuorma

Taulukko 5. Kertoimen μ_i arvoja. [37, s. 41]	
Pinnan laatu tai karkeus	μ_i
Sileä jääpinta	0,0010
Luminen jääpinta	0,0015
Karkea jääpinta	0,0020
Ahtautunut jääkenttä	0,0030

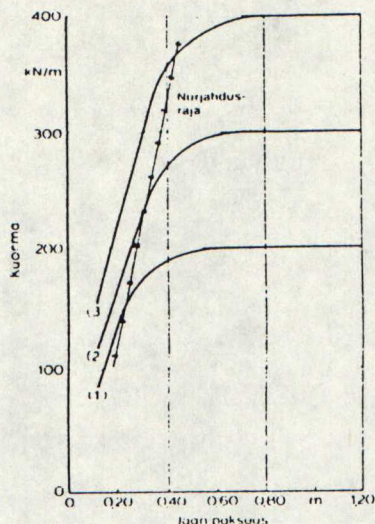


Kuva 16. Hydrodynaamisen muotokertoimen μ_k arvot. Reynoldsin lukua määritettäessä oletetaan karakteristiseksi pituudeksi rakenteen suurin pituus virran suunnassa.

[37, s. 52]

Lämpötilan kohoamisen seurauksena jääpeite laajenee, mikä puolestaan aiheuttaa vaakasuoria kuormia kenttää rajoit-

taviin seinämiin. Pystyseinään kohdistuva suurin vaakuorma saadaan kuvasta 17.



Kuva 17. Lämpötilan kohoamisen takia laajenevan jääkentän aiheuttamat maksimikuormat jääkenttää rajoittaviin seinämiin. [37, s. 57]

Pystyseinään kohdistuvan jääkuorman voidaan olettaa olevan edellä olevia pienemmän mm. seuraavissa tapauksissa:

a. Jääkenttä on pitkä.

Kuvasta 17 saatavan jääkuorman arvoa voidaan pienentää kertomalla saatu arvo kertoimella k .

$k = 1,0$ kun jääkentän pituus ≤ 50 m

$k = 0,6$ kun jääkentän pituus ≥ 150 m

Väliarvot interpoloidaan suoraviivaisesti.

b. Rakenne on joustava. Jääkuorman suuruus riippuu rakenteen siirtymistä ja jäykkyydestä.

c. Jääkenttä ei saa täyttä tukea vastareunaltaan esimerkiksi rannan kaltevuuden takia.

d. Rakenne on joka puolelta jääkentän ympäröimä siten, että termiset kuormat osittain kumoavat toisensa.

e. Paikka on suojassa tuulelta ja jäällä voidaan olettaa olevan lunta.

Yksittäisen, laajan jääkentän ympäröimään rakenteeseen vaikuttavat termiset jääkuormat on harkinnan mukaan otaksuttava kuvan 17 arvoja suuremmiksi. Ääritapauksissa jää murtuu rakennetta vasten, jolloin kuorma määritetään kuten liikkuvan jääkentän tai jäälautan kuorma.

5.2.1.2 Liikkuva jääkenttä tai jäälautta [37, s. 58]

Yksittäiseen pystysuoraan rakenteeseen kohdistuva suurin staattinen kuorma P_1 rakenteen leikatessa liikkuvaa jääkenttää tai jäälauttaa määritetään kaavalla

$$P_1 = k_1 k_2 k_3 b h \sigma_{ip} \quad (27)$$

jossa k_1 on taulukosta 6 saatava muotokerroin

k_2 jään ja rakenteen välinen kosketuskerroin

$k_2 = 1,0$ kun rakenteeseen kiinnijäänyt kenttä lähtee liikkeelle

$k_2 = 1,5$, kun jää on tarttunut rakenteeseen

$k_2 = 0,5$ kun jää on jatkuvassa murtotilassa

k_3 on muotosuhdekerroin

$$k_3 = 1 + 1,5 h/b$$

b on rakenteen leveys jääkuorman vaikutustasolla

h jään paksuus

σ_{ip} jään puristuslujuuden ominaisarvo

$\sigma_{ip} = 3,0 \text{ MN/m}^2$ kun jää on ehjää ja liikkuu tuulen tai virtauksen vaikutuksesta kylmimpänä aikana sydäntalvella

$\sigma_{ip} = 2,5 \text{ MN/m}^2$ kun jää on ehjää ja liikkuu kylmimpänä aikana vain hitaasti esim. termisten jännitysten vaikutuksesta

$\sigma_{ip} = 1,5 \text{ MN/m}^2$ kun jää on ehjää ja liikkuu keväällä lämpötilan ollessa lähellä sulamispistettä

$\sigma_{ip} = 1,0 \text{ MN/m}^2$ kun jää on sulamisen vuoksi osittain heikentynyt ja liikkuu lämpötilan ollessa lähellä sulamispistettä

Taulukko 6. Kerroin k_1 . [37, s. 59]						
Rakenteen etupinnan muoto jääkuorman vaikutustasolla						
	Puoli- ympyrä	Suora- kaide	Kolmio, jonka kärkikulma on			
			$\leq 45^\circ$	$\leq 60^\circ$	$\leq 90^\circ$	$\leq 120^\circ$ $\geq 150^\circ$
k_1	0,9	1,0	0,5	0,6	0,7	0,8 1,0

Jos yksittäisen rakenteen etureuna on kalteva, valitaan rakenteeseen kohdistuvaksi vaakasuoraksi kuormaksi pienempi kuormista P_1 ja P_2 . P_2 lasketaan kaavalla

$$P_2 = k_2 k_4 \tan \beta \sigma_{it} h^2 \quad (28)$$

jossa k_2 on kosketuskerroin, sama kuin kaavassa 27

k_4 muotosuhdekerroin

$k_4 = 0,2 b/h$, kun rakenteen etuseinä on vino

$k_4 = 1 + 0,05 b/h$, kun etuseinä on puoliympyrän muotoinen

b on rakenteen leveys jääkuorman vaikutustasolla

h jään paksuus

β rakenteen etuseinän kaltevuuskulma vaakata-
sosta

σ_{it} jään taivutuslujuuden ominaisarvo

$$\sigma_{it} = 0,65 \sigma_{ip}$$

Kaltevaan pintaan vaikuttava pystysuora kuorma P_v jään taivutusmurrossa määritetään kaavalla

$$P_v = P_2 / \tan \beta \quad (29)$$

5.2.2 Sivusuhteen huomioonottava laskentamalli [6]

Oulun yliopiston laskentamallissa tarkastellaan liikkuvan jään aiheuttamia kuormia. Rakenteet jaetaan kapeisiin, keskileveisiin ja leveisiin sivusuhteen mukaan. Sivusuhte on rakenteen leveyden suhde jään paksuuteen.

Kapeiksi katsotaan rakenteet, joiden sivusuhte on 1...5. Useat tutkijat ovat havainneet, että sivusuhteen ylittäessä arvon 4...5 jään aiheuttama paine tulee vakioksi. Tunkeutumisessa syntyvät jäävoimat ovat riippuvaisia sivusuhteesta vain tätä pienemmillä arvoilla. Kapeat rakenteet ovat myös alttiita jään ja rakenteen vuorovai-
kutuksessa syntyville värähtelyille.

Keskileveisiin rakenteisiin (sivusuhte välillä 5...20) kohdistuvien jääkuormien arvioinnissa tulee huomioida lisäksi jään pysähtyminen rakenteeseen tai kasautuminen sen eteen.

Leveät rakenteet (sivusuhte yli 20) ovat alttiita jään pysähtymiselle ja kasautumiselle rakenteen eteen. Jään törmätessä leveään rakenteeseen murtuminen voi tapahtua eriaikaisesti rakenteen leveydellä jään ja rakenteen paikallisten kosketusvaihteluiden vuoksi. [6, s. 10] Kun määritetään leveisiin rakenteisiin kohdistuvia jääkuormia tarkastellaan yleensä keskimääräistä kokonaisvoimaa, joka saattaa koostua suuristakin osakuormista. Näin rakenne voi paikallisesti joutua kestäämään suuriakin kuormia. [6, s. 154]

5.2.2.1 Kapeat rakenteet

Pystysuorien yksittäisten pylväiden jäävoimat lasketaan periaatteella: jäävoima on korjattu efektiivinen jään paine kertaa projektiopinta-ala. Kolmedimensionaalinen jännitystila korvataan yksiaksiaalisella puristuslujuudella, joka kerrotaan rakenteen leveys-jäänpaksuussuhteen ja/tai rakenteen muodon huomioivilla kertoimilla. [6, s. 26]

Näihin periaatteisiin perustuvia kaavoja on useita, esimerkiksi niistä on American Petroleum Instituten esittämä kaava (API, 1983) [6, s. 26]

$$F = I f_c C_x D t \quad (30)$$

jossa F on horisontaalivoima [kN]

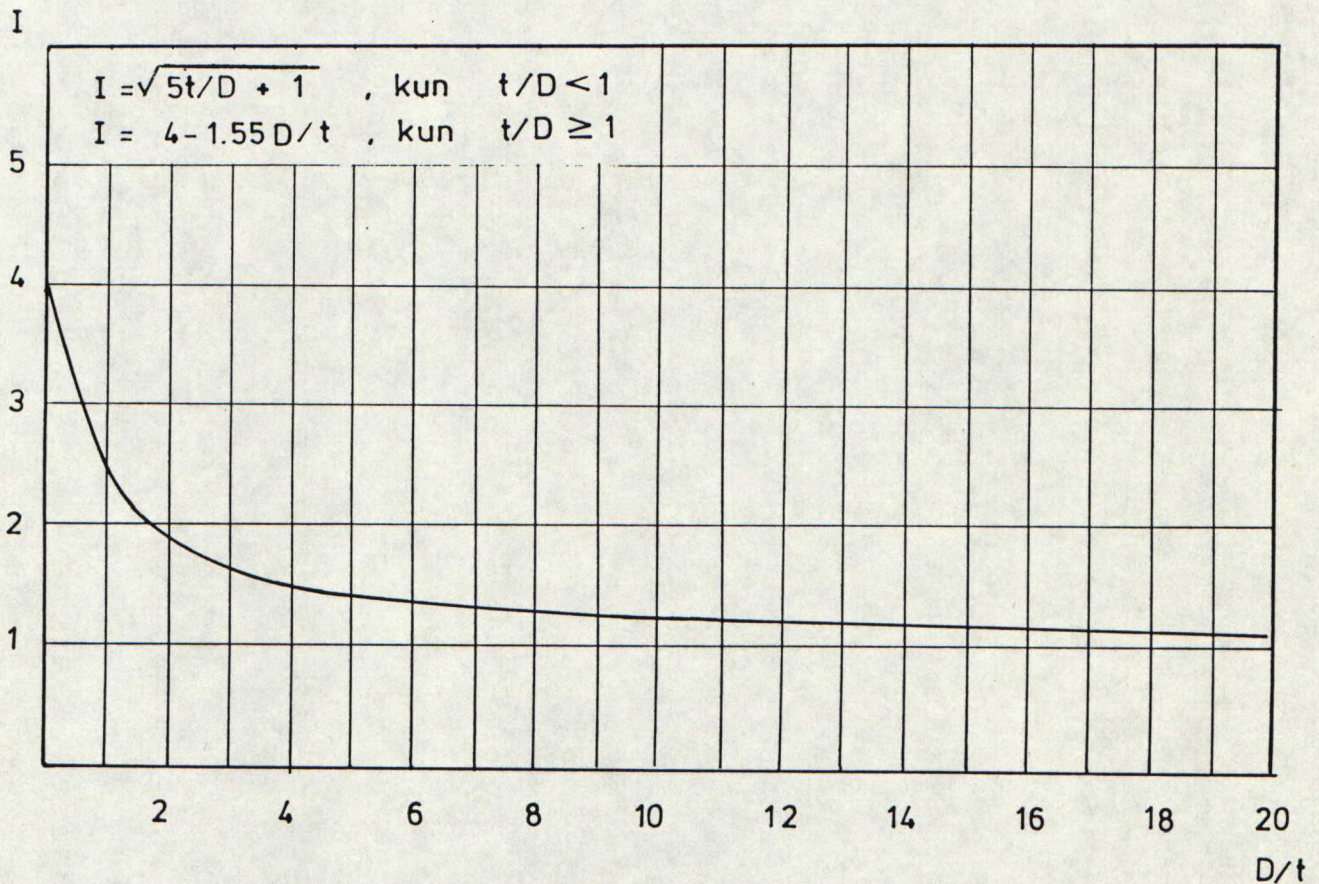
I tunkeumakerroin, määritetään kuvan 18 avulla

f_c kontaktikerroin

C_x jään vapaa puristuslujuus [kPa]

D rakenteen leveys tai halkaisija [m]

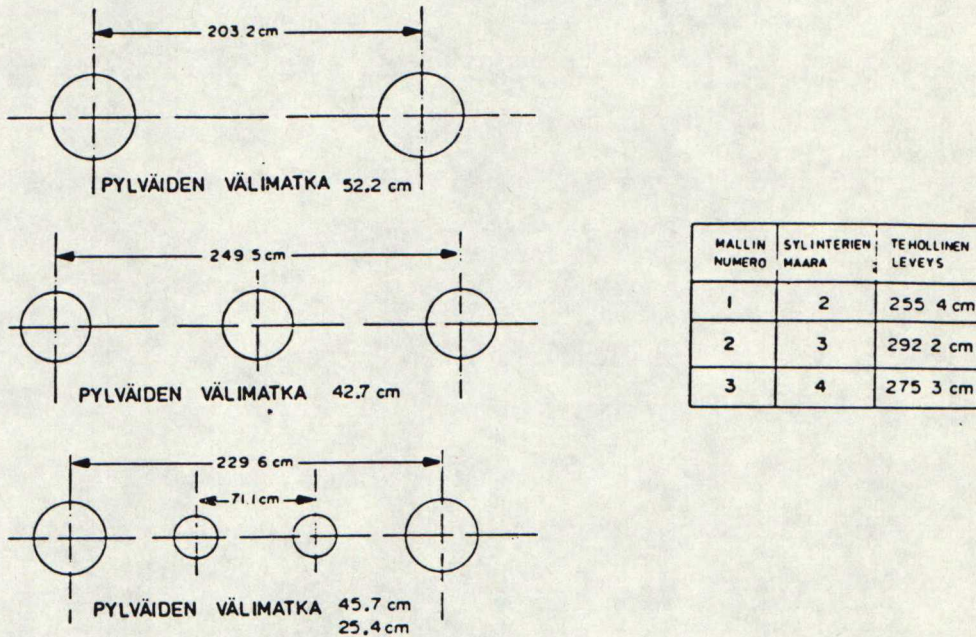
t jään paksuus [m]



Kuva 18. Tunkeumakerroin I . [6, s. 29]

Kontaktikertoimeksi f_c voidaan ottaa arvo väliltä 0,45...1,0, jolloin arvo 1,0 ilmaisee jään täydellisen kosketuksen rakenteeseen. Jään vapaa puristuslujuus C_x saadaan lujuuskokeista tai kirjallisuudesta.

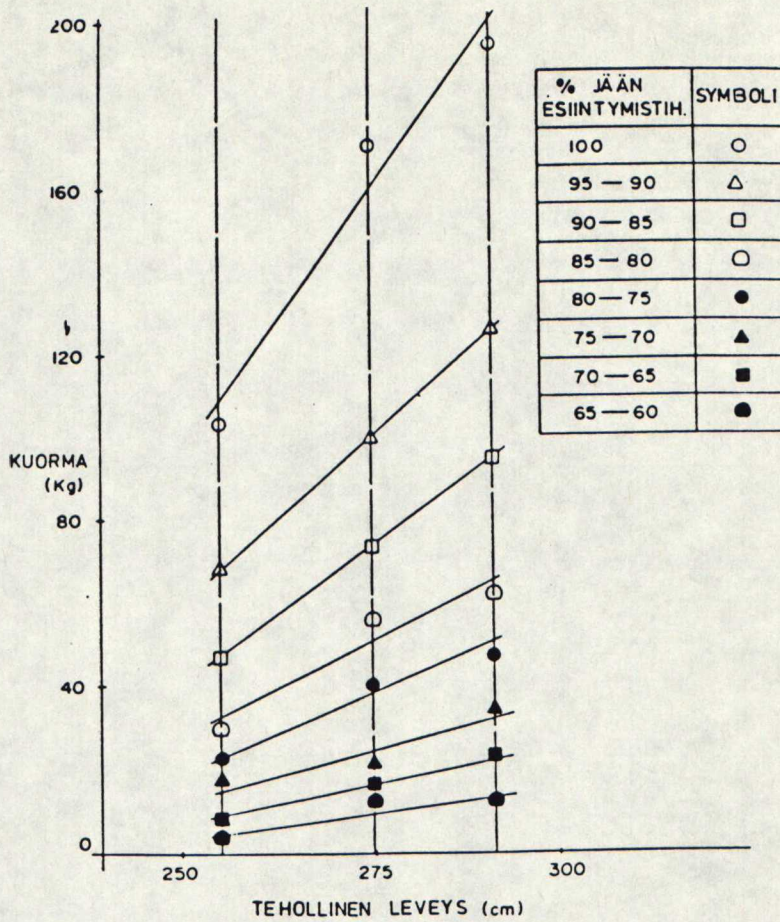
Jään pystysuoriin monijalkaisiin rakenteisiin aiheuttamia kuormia voidaan arvioida mallikokeilla. Noble et al'n kokeiden tuloksia on esitetty kuvissa 19 ja 20.



Kuva 19. Puoliupotetun rakenteen jalkojen sijoittelumallit. [6, s. 76]

5.2.2.2 Keskileveät rakenteet

Keskileveille rakenteille ei ole olemassa yksikäsitteistä laskentamenetelmää. Ohjeena voidaan pitää kapeiden ja leveiden rakenteiden kuormia. Näiden pohjalta valitaan sopiva arvo. Ongelmana on jään eri aikainen murtuminen rakenteen eri kohdissa, jolloin kokonaisrasitus voi olla pienempi kuin kapean rakenteen menetelmällä laskettu arvo (ks. kohta 5.2.2.1). [6, s. 90]



Kuva 20. Jääkuorman riippuvuus rakenteen leveydestä.
[6, s. 78]

5.2.2.3 Leveät rakenteet

Kryn menetelmällä voidaan arvioida pystysuoraan rakenteeseen kohdistuva kokonaisvoima jään vaikuttaessa siihen. Tietyn suunnittelupaineen ylittymisriski leveään rakenteen elinaikana oletetulla hitaalla jään liikkeellä voidaan määrittää tilastollisella arviointimenetelmällä. Rakenne jaetaan kaistoihin, joissa jää murskautuu eriaikaisesti ja syntyvät paineet ovat toisten kaistojen paineista riippumattomia. [6, s. 124]

Paikallinen paine σ_{D1} jakautuu log-normaalisti keskiarvolla $\bar{\sigma}_1$ ja geometrisella standardipoikkeamalla σ_{g1} . Pai-

kallinen paine ylitetään todennäköisyydellä P. Se saadaan kaavalla

$$\sigma_{D1} = \bar{\sigma}_1 \sigma_{g1}^y \quad (31)$$

Jos tietyn paineen ylittämisen riski rakenteen elinaikana on todennäköisyyden P erikoisfunktio ja riski on riippumaton kaistojen määrästä, saadaan annetuilla arvoilla P ja y määritetyksi suunnittelupaine n-kaistaiselle rakenteelle kaavasta

$$\frac{\sigma_{Dn}}{\bar{\sigma}_1} = \frac{\exp(1/2 \ln^2 \sigma_{g1}) \exp\{y[\ln(1 - 1/n + 1/n \exp(\ln^2 \sigma_{g1}))]\}^{1/2}}{[1 - 1/n + 1/n \exp(\ln^2 \sigma_{g1})]^{1/2}} \quad (32)$$

Kaistan lähtöarvot saadaan joko mitatuista jäänpaineista tai simuloimalla murskautumistapahtumaa mittaustuloksien pohjalta.

Croasdalen mukaan kalteviin rakenteisiin kohdistuvat vaaka- ja pystyvoimat voidaan laskea kaksidimensionaalisen tarkastelun pohjalta seuraavasti

$$H = 0,68 b \sigma_f \left(\frac{\rho_w g t^5}{E} \right)^{1/4} \left(\frac{\sin \alpha + \mu \cos \alpha}{\cos \alpha - \mu \sin \alpha} \right) \quad (33)$$

$$+ Z b t \rho_i g \left[\frac{(\sin \alpha + \mu \cos \alpha)^2}{\cos \alpha - \mu \sin \alpha} + \frac{\sin \alpha + \mu \cos \alpha}{\tan \alpha} \right]$$

$$V = \frac{(H - P \cos \alpha)(\cos \alpha - \mu \sin \alpha)}{(\sin \alpha + \mu \cos \alpha)} - P \sin \alpha \quad (34)$$

joissa b on rakenteen leveys

σ_f jään taivutuslujuus

ρ_w veden tiheys

μ jään ja rakenteen välinen kitkakerroin

α	rakenteen kaltevuuskulma
Z	rakenteen kaltevan osan korkeus
ρ_i	jään tiheys
t	jään paksuus
E	jään kimmokerroin

$$P = \frac{Z}{\sin\alpha} t b \rho_i g (\sin\alpha + \mu \cos\alpha) \quad (35)$$

5.3 Ahtojääkuormat

Ahtojään rakenteille aiheuttamat staattiset kuormitukset riippuvat veden virtauksen kitkasta, ahtauman reunaan kohdistuvasta hydrodynaamisesta voimasta, ahtauman oman painon vaakasuorasta komponentista ja ilmavirran kitkasta. [13, s. 84]

Murskajään muodostumiskuormalla tarkoitetaan ei-tiivistyneen jääkasan kuormaa rakennetta vasten. Jään ahtautumista tapahtuu, kun jääkuori murtuu lommahtamalla ja rikkoutunut jää kasautuu useisiin kerroksiin. Kun paine jatkuu, murskakerros kasvaa vedenpinnan ylä- ja alapuolelle. Kun jääkuori murtuu tällä tavoin, murtuva jää kasautuu jääkuoren reunaan. Koska jää on murtuneessa tilassa, yksittäiset kontaktialueet ovat pieniä ja rakenteeseen välittyvä keskimääräinen kuorma on näin ollen pieni. Kokonaiskuorma saattaa kuitenkin olla suuri. Jos jää ei ole yhtenäistä, vaan muodostunut rikkoutuneista jäämassoista, kuten suppopadot ja ahtojäävallit, murskautumislujuudelle voidaan käyttää arvoa 0,7 MPa. [4, s. 23]

5.3.1 Kuormitusohjeet

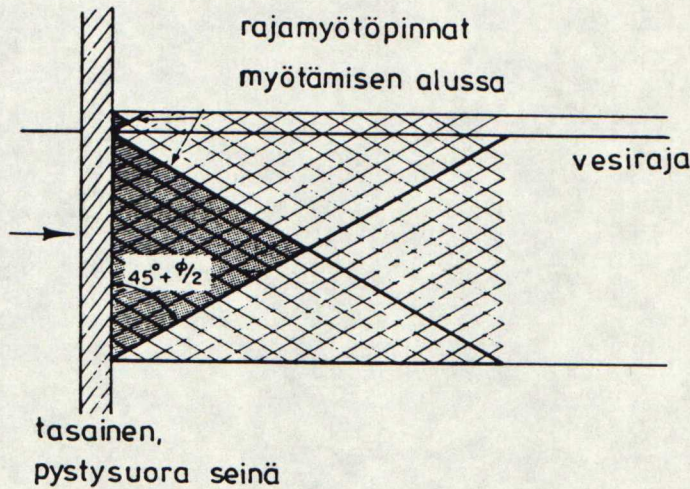
Jos liikkuvassa jääkentässä on ahtautumia, oletetaan näiden aiheuttamaksi kuormaksi $k_5 P_1$, $k_5 P_2$ tai $k_5 P_v$, joissa $k_5 = 1,5 \dots 4,0$ ahtautuman mittasuhteista riippuen. P_1 , P_2 ja P_v määritetään kuten kohdassa 5.2.1.2. [37, s. 60]

5.3.2 Sivusuhteen huomioonottava laskentamalli

5.3.2.1 Kapeat rakenteet

Kun arvioidaan murskautuneen jään tai ahtojään aiheuttamia kuormia pystysuoriin yksittäisiin pylväisiin, on niihin lisättävä tasaisen jään aiheuttama kuorma, jotta saadaan kokonaiskuorma. [6, s. 37]

Mellor on esittänyt menetelmän murskautuneen jään rakenteeseen aiheuttaman normaalijännityksen laskemiseksi. Samalla otetaan huomioon myös jääkappaleiden välillä vaikuttava koheesio. Tarkastellaan painovoiman ja nosteen voimatasapainoa jäässä (kuva 21).



Kuva 21. Leveän, tasaisen pystysuoran seinän tunkeutuminen murskautuneeseen jäähän. [6, s. 40]

Maanpaineteorian pohjalta vaakasuoraksi voimaksi R pituusyksikköä kohden saadaan

$$R = \frac{1}{2} \left(\frac{1+\sin \phi}{1-\sin \phi} \right) (1-n) \rho_i g \left(1 - \frac{\rho_i}{\rho_w} \right) t^2 + 2ct \left(\frac{1+\sin \phi}{1-\sin \phi} \right)^{1/2} \quad (36)$$

jossa ϕ on murskautuneen jään kitkakulma

n jäämassan huokoisuus

ρ_i jään tiheys

ρ_w veden tiheys

t jäämurskan paksuus

c koheesio [Pa]

Monijalkaisille rakenteille ei ole olemassa ahtojäävalli-kuormien laskentamenetelmää. American Petroleum Institute suosittaa mallikokeita, jotta saadaan selville viereisten jalkojen vaikutus jään murtumiseen yksittäistä jalkaa tarkasteltaessa. Yksittäisille pylväille tarkoitettuja kaavoja voidaan käyttää suuntaa-antavina. On kuitenkin huomattava, että monijalkaisiin rakenteisiin voi kohdistua suurempia jääkuormia kuin mitä saadaan laskemalla yksittäisiin jalkoihin kohdistuvat kuormat yhteen. [6, s. 81]

5.3.2.2 Keskileveät rakenteet

Pystysuorille rakenteille ei ole olemassa yksikäsitteisiä menetelmiä jääkuormien määrittämiseksi. Tässä pätee sama kuin kohdassa 5.2.2.2 tasaisen jään kuormat keskileveisiin rakenteisiin. [6, s. 90]

Ahtojäiden keskileveisiin ja leveisiin kartiomaisiin ja muihin kalteviin rakenteisiin aiheuttamien kuormien laskentamenetelmiä on vähän, sillä yleensä on keskitytty vain tasaisen jään aiheuttamiin kuormiin. Croasdale ehdottaa käytettäväksi kaavaa, jolla voidaan laskea ahtojäävallin kaksipuolisessa leikkautumisessa (kuva 22) aiheutuva kuorma. [6, s. 107]

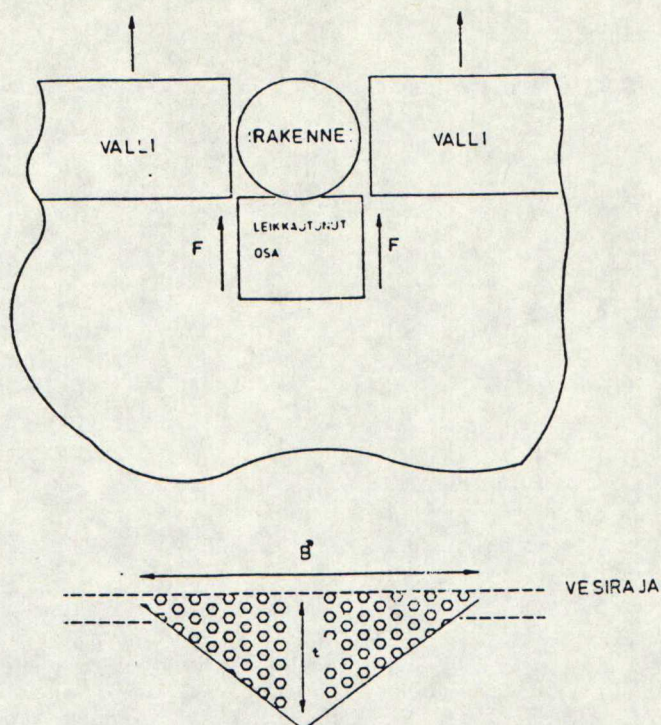
$$2 F = \frac{2 B t^2}{3} \rho_b g \tan \phi \quad (37)$$

jossa B on ahtojäävallin leveys

t ahtojäävallin paksuus

$$\rho_b = \rho_w - \rho_i \approx 100 \text{ kg/m}^3$$

ϕ vallin sisäinen kitkakulma



Kuva 22. Ahtojäävallin kaksipuolinen leikkautuminen.
[6, s. 108]

Joensuun [38] mukaan yksivuotisen ahtojään kartiomaiseen rakenteeseen aiheuttama kuorma voidaan laskea kaavalla

$$H \approx 10 \rho_w g H_s^2 b + 45 \rho_w g \frac{H_s^3}{\tan \alpha} \quad (38)$$

jossa ρ_w on veden tiheys

g maan vetovoiman kiihtyvyys

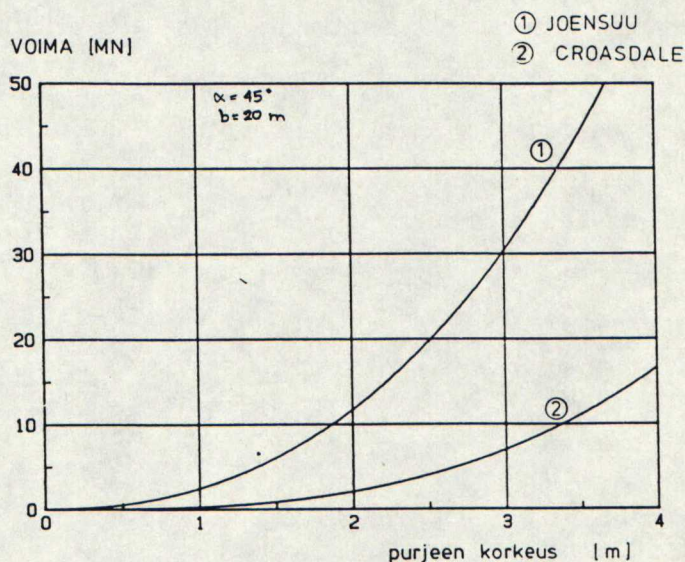
H_s purjeen korkeus

b rakenteen leveys

α kartion kaltevuuskulma

Tasaisen jään osuus lasketaan erikseen.

Kuvassa 23 on vertailtu edellä olleilla kahdella menetelmällä laskettuja kuormia. Vallin leveydeksi on oletettu $5,5 \cdot$ vallin paksuus, jonka on oletettu olevan $5 \cdot$ purjeen korkeus. Kitkakulmaksi on valittu 30° . Kaavassa 37 ensimmäinen termi kuvaa voimaa, joka tarvitaan vallin potentiaalienergian kasvattamiseen ja toinen voimaa, joka tarvitaan kitkavoiman voittamiseen lohcareiden välillä. Croasdalen kaavalla saadaan vain vallin leikkautumisvoiman. Kuten kuvasta 23 huomataan ero tulosten välillä on suuri, eikä kaavojen oikeellisuuteen siten voi täysin luottaa.



Kuva 23. Yksivuotisen ahtojään aiheuttamat jääkuormat.
[6, s. 110]

5.3.2.3 Leveät rakenteet

Murskautunut jää ja yksivuotinen ahtojää pysähtyvät pys-tysuoraan leveään rakenteeseen ja välittävät takanaan olevan tasaisen jään murtumisesta aiheutuvat kuormat rakenteeseen. Tasainen jää joko nousee rökkiötä pitkin, tunkeutuu rökkiöön tai murskautuu rökkiötä vasten. [6, s. 130]

Shapiron kaavalla voidaan laskea tarvittava voima pituusyksikköä kohti jään noustessa röykkiötä pitkin. Kaava on muotoa

$$F = \rho_i g t L (\sin \theta + \mu \cos \theta) \quad (39)$$

jossa F on pituusyksikköä kohti tuleva voima jään kiipeämissuunnassa

ρ_i jään tiheys
 t jään paksuus
 L röykkiötä pitkin nousevan jäälevyn pituus
 θ jääröykkiön kallistuskulma
 μ kitkakerroin jään ja röykkiön välillä

Shapiron ja Kryn kehittämällä kaavalla voidaan arvioida jään kasautumiseen tarvittava voima vallin leveysyksikköä kohti.

$$F_s = \rho_i g t H_s \frac{\left[\left(\frac{\rho_w - \rho_i}{\rho_i} \right) \left(\frac{H_k}{H_s} \right)^2 + 1 \right]}{2 \left[\frac{H_k}{H_s} + 1 \right]} \quad (40)$$

jossa H_s on vallin purjeen korkeus
 H_k kölin syvyys

Kaava 40 pätee tapaukselle, jossa valli on pohjautunut.

Kelluvalle vallille voima leveysyksikköä kohti on Parmerterin ja Coonin mukaan [6, s. 131]

$$F_p = 1/2 H_s t g \left(\rho_i + \frac{\mu H_s \rho_r \xi}{t \tan \phi} \right) \quad (41)$$

jossa μ on kitkakerroin jäälevyn ja vallin välillä

$\rho_r = (1 - \gamma) \rho_i$, jossa γ on ahtojään huokoisuus
 ρ_i jään tiheys

$$\xi = \frac{\rho_i}{\rho_w - \rho_i}, \text{ jossa } \rho_w \text{ on veden tiheys}$$

ϕ on kiilan kulma vaakatasoon nähden

Tapaukseen, jossa jäälevy tunkeutuu kasautumisen aikana purjeen läpi, Kry esittää kaavan

$$F_f = \mu \rho_r g \eta H_s^2 \cot \theta \quad (42)$$

jossa F_f on voiman kitkakomponentti vallin pituusyksikköä kohti

η se osa purjeen massasta, joka aiheuttaa kitkavoiman

θ jääryötkiön kallistuskulma

Yhtälöt 40 ja 42 eivät sisällä jääryötkiön muodonmuutosenergiaa, leikkausvaikutuksia eivätkä voimia, jotka vaaditaan jäälevyn taivuttamiseksi tai murskaamiseksi. Vivatratin mukaan nämä voidaan huomioida kaavaan 39 perustuvalla kaavalla [6, s. 132]

$$F_H = \rho_i H g t (\tan \theta + \mu) / \sin \theta \quad (43)$$

jossa F_H on horisontaalivoima pituusyksikköä kohti

H ahtojäävallin korkeus

Kartiomaisten ja muiden kaltevien rakenteiden osalta viitataan kohtaan 5.3.2.2 ahtojääkuormat keskileveisiin rakenteisiin.

5.3.3 Maamekaniikkaan perustuva laskentamalli

Määttäsen kehittämä laskentamenetelmä perustuu maamekaniikkaan siten, että murskautuneen jään tai ahtojään oletetaan käyttäytyvän kuten lineaarinen, koheesinen Mohr-Coulomb aine. [6, s. 38]

Yksivuotisen ahtojäävallin aiheuttamaksi painejakaumaksi pystysuoralle rakenteelle oletetaan kuvan 24 mukainen

jakauma. Ahtojäävallin ja tasaisen jään aiheuttamaksi kokonaiskuormaksi saadaan

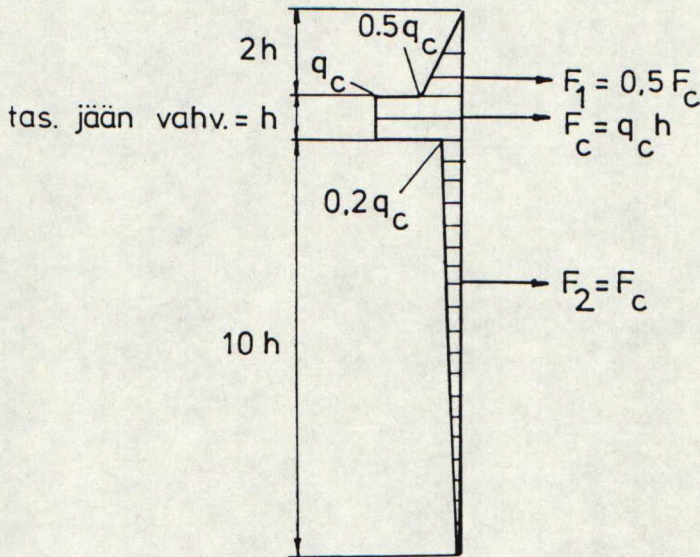
$$F = F_c + F_1 + F_2 \quad (44)$$

jossa F on kokonaiskuorma

F_c tasaisen jään murskautumiskuorma

$F_1 = 0,5 F_c$ (purjeen aiheuttama kuorma)

$F_2 = 1,0 F_c$ (kölin aiheuttama kuorma)



Kuva 24. Tasaisen jään ja ahtojään aiheuttama paineja-kauma pystysuoraan rakenteeseen. [6, s. 39]

5.4 Kiinnijäätyriskuormat

Kiinnijäätyriskuormat syntyvät, kun jääkenttä jäätyy kiinni rakenteeseen, jään liike pysähtyy ja ilman lämpötila on riittävän matala.

5.4.1 Kuormitusohjeet [37, s. 61]

Vedenpinnan noustessa tai laskiessa aiheuttaa seinämäiseen rakenteeseen kiinnitarttunut jää siihen ylös- tai alaspäin suuntautuvan kuorman V , joka määritetään kaavalla

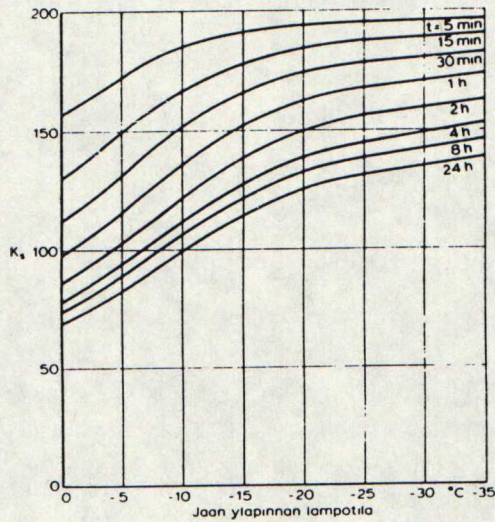
$$V = k_s v_v t h^{3/4} \quad [\text{kN/m}] \quad (45)$$

jossa k_s saadaan kuvasta 25

v_v on vedenpinnan nousu- tai laskunopeus [m/h]

t aika [h] hetkestä, jolloin vedenpinta alkaa nousta tai laskea

h jään paksuus [m]



Kuva 25. Kerroin k_s . [37, s. 62]

Yksittäiseen rakenteeseen kiinnittynyt jää aiheuttaa vedenpinnan noustessa tai laskiessa siihen ylös- tai alaspäin suuntautuvan kuorman V , jonka suurin arvo määritetään kaavalla

$$V = k_v \sigma_{it} h^2 \quad (46)$$

jossa k_v on rakenteen läpimitan d ja jään paksuuden h suhteesta riippuva kerroin (taulukko 7)

σ_{it} jään taivutuslujuus (ks 5.2.1.2)

Taulukko 7. Kerroin k_v . [37, s. 62]									
d - h	0,1	0,2	0,5	1	2	3	5	10	20
k_v	0,16	0,18	0,22	0,26	0,30	0,36	0,43	0,63	1,1

Kiinnitarttuneen jään seinään aiheuttama taivutusmomentti M vedenpinnan noustessa tai laskiessa saadaan kaavalla

$$M = (k_s / 20) V h^{3/4} \quad [\text{MNm}] \quad (47)$$

jossa k_s saadaan kuvasta 25

V saadaan kaavasta 46 [MN]

h on jään paksuus [m]

5.4.2 Sivusuhteen huomioonottava laskentamalli

5.4.2.1 Kapeat rakenteet

Pystysuora kokonaisvoima F , joka tarvitaan irrottamaan pyöreään pilariin kiinnijäätynyt jää, voidaan laskea adheesiolujuuden avulla. [6, s. 69]

$$F = q \pi D t \quad (48)$$

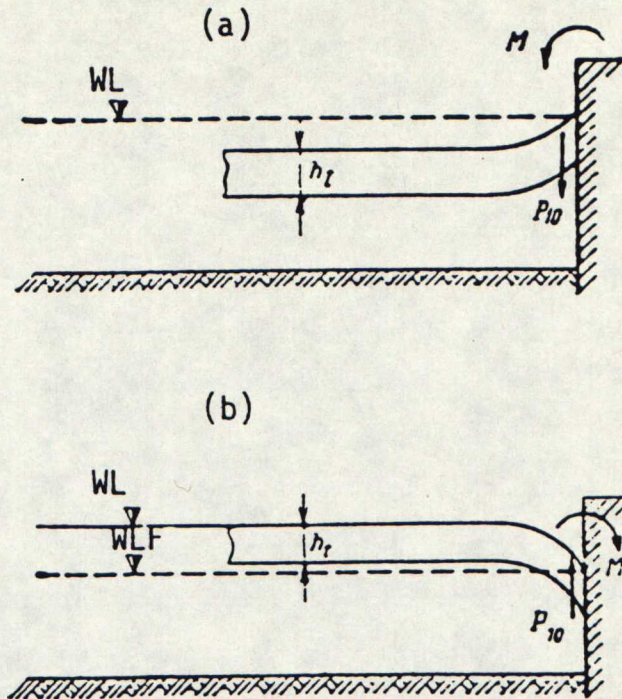
jossa q on pilarin ja jään välinen adheesiolujuus

D pilarin halkaisija

t jään paksuus

5.4.2.2 Keskileveät rakenteet

Vedenpinnan vaihtelun vuoksi jään pystysuoraan rakenteeseen aiheuttamia kuormia voidaan arvioida venäläisen jokistandardin mukaan. [6, s. 91] Kuvassa 26 rakenteeseen kohdistuu pystysuora voima P_{10} ja taivutusmomentti M vedenpinnan W_L noustessa (a) tai laskiessa (b).



Kuva 26. Rakenteeseen kiinnijäätymisestä aiheutuvat kuormat. [6, s. 91]

Kuorma P_{10} [tonnia] saadaan kaavalla [6, s. 92]

$$P_{10} = 20 B u T (h_t/\phi)^{3/4} \quad (49)$$

jossa B on rakenteen leikkauspinnan pituus jään vaikutus-
tasolla [m]

u vedenpinnan nousu- tai laskunopeus [m/h]

T aika [h], jona vedenpinnan nousun tai laskun
aiheuttama jääpeitteen muodonmuutos tapahtuu

h_t jääpeitteen maksimivahvuus [m] 1 %:n luotet-
tavuudella

ϕ dimensioton ajan funktio, joka määritetään
kaavalla

$$\phi = 1 + \frac{3 \cdot 10^4}{\mu} [T + 50(1 - e^{-0,4T})] \quad (50)$$

jossa μ on muovautumiskerroin [tonnia * h/m²], saadaan taulukosta 8

Taulukko 8. Muovautumiskerroin μ . [6, s. 92]	
Jään lämpötila $t_{jää}$ [°C]	Kerroin μ
≥ -20	$(2,3 - 0,28 t_{jää} + 0,083 t_{jää}^2) * 10^4$
< -20	$(3,3 - 1,85 t_{jää}) * 10^4$

Venäläinen jokistandardi on kehitetty jokiolosuhteisiin, joten sen antamiin tuloksiin on syytä suhtautua varovaisesti.

Kartiomainen rakenne murtaa jään taivuttamalla, kun pystysuoralla rakenteella murtuminen tapahtuu murskautumalla. Tämän takia kartiomaiseen rakenteeseen kohdistuvat jääkuormat ovat pienempiä kuin pystysuoraan rakenteeseen kohdistuvat kuormat. [6, s. 96]

Ralston on esittänyt elastisuus-plastisuus -teoriaan perustuvan menetelmän jäävoimien laskemiseksi. Ylöspäin murtavaan kartioon kohdistuva vaakavoima on

$$R_H = [A_1 \sigma_f t^2 + A_2 \rho_w g t D^2 + A_3 \rho_w g t_r (D^2 - D_T^2)] A_4 \quad (51)$$

ja pystyvoima on

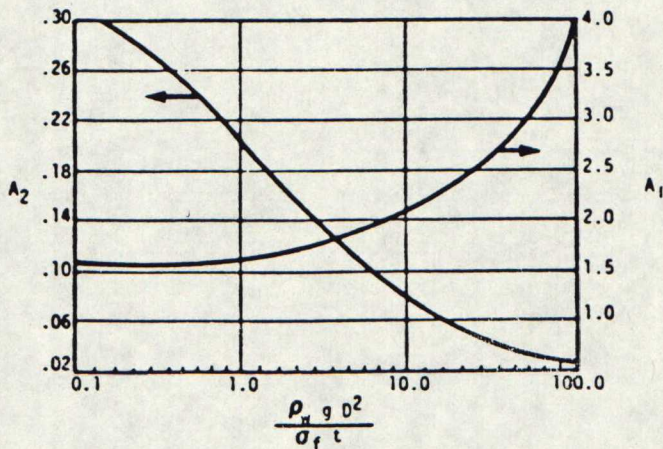
$$R_V = B_1 R_H + B_2 \rho_w g t_r (D^2 - D_T^2) \quad (52)$$

joissa $\rho_w g$ on veden ominaispaino

- σ_f tasaisen jään taivutuslujuus
- t jään paksuus
- t_r ylösnousseen jääkerroksen paksuus
- D kartion halkaisija vesirajalla

D_T kartion huipun halkaisija

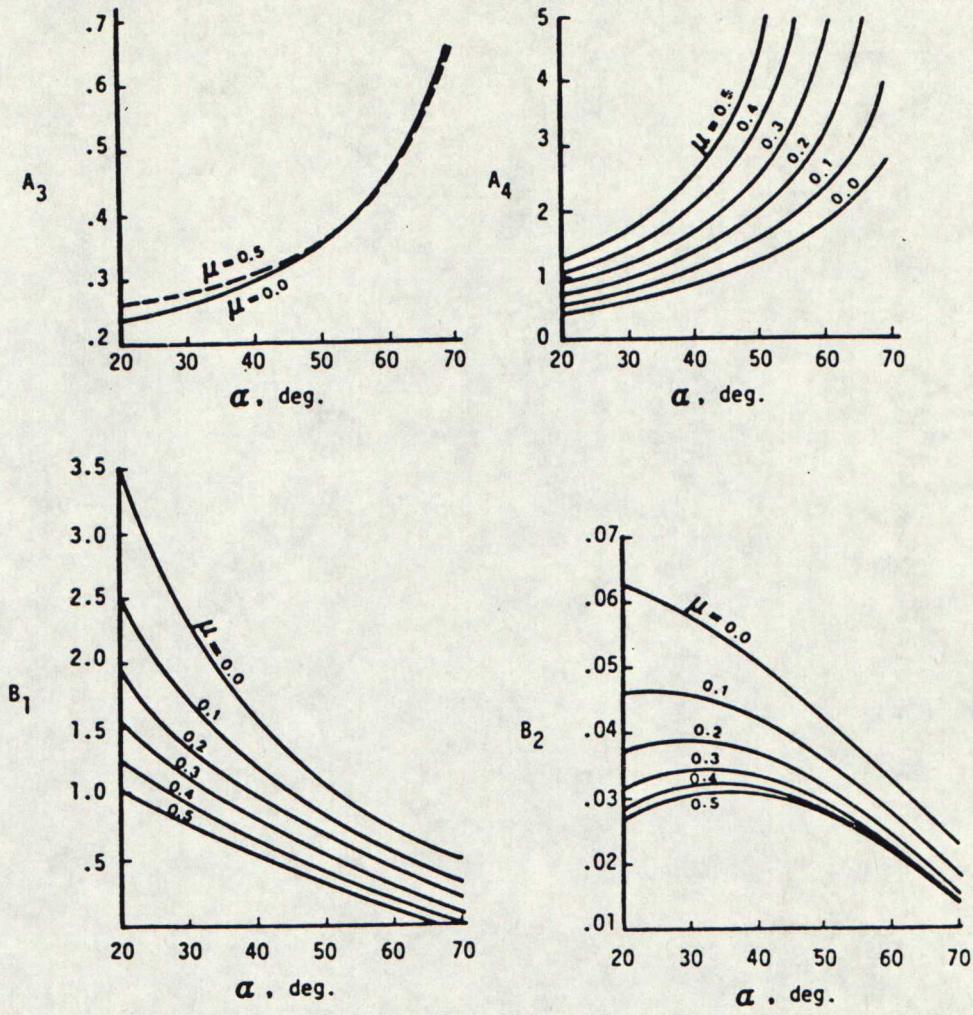
Vakiot A_1 , A_2 , A_3 , A_4 , B_1 ja B_2 luetaan kuvista 27 ja 28, joissa μ on jään ja rakenteen välinen kitkakerroin ja α vaakatasosta mitattu kartiokulma. Ylöspäin murtava kartio kapenee ylöspäin. Alaspäin murtavan kartion voimat saadaan korvaamalla $\rho_w g$ termillä $\rho_w g/9$ kaavoissa 51 ja 52.



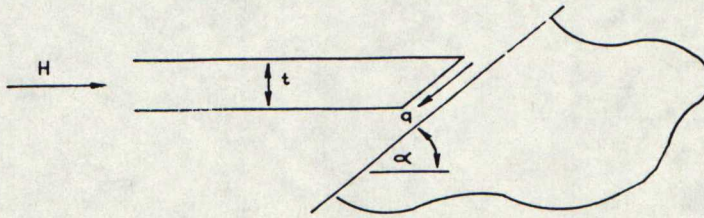
Kuva 27. Kertoimet A_1 ja A_2 . [6, s. 98]

Kaavan 51 antama voima koostuu osavoimista, jotka tarvitaan jään murtamiseksi, ylös työntämiseksi ja syrjäyttämiseksi kartion pinnalta.

Kuvan 29 tilanteessa, jossa tasainen jää on jäätynyt kiinni kaltevaan rakenteeseen, voidaan jään rakenteesta irrottamiseen tarvittava horisontaalivoima H määrittää adheesiolujuuden q avulla.



Kuva 28. Kertoimet A_3 , A_4 , B_1 ja B_2 . [6, s. 98]



Kuva 29. Kiinnijäätymissidoksen murtuminen. [6, s. 119]

Kartiolle, jonka halkaisija vesirajassa on D , saadaan irrottamisvoimalle H_{ad} lauseke

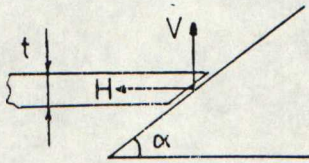
$$H_{ad} = \frac{\pi t q D}{\tan \alpha} \quad (53)$$

jossa t on jään paksuus

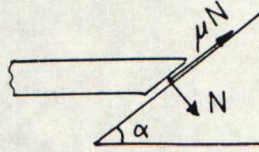
q kartion ja jään välinen adheesiolujuus

α kartion kaltevuuskulma

Kaavassa oletetaan kiinnijäätymispinnan ulottuvan koko kartion ympäri. Kuva 30 esittää tilannetta, kun jään irtoamishetkellä adheesiosidos murtuu. Kitkavoima vastustaa jään liikkumista rakenteen pintaa pitkin.



Rakenteen voimat
jäähän



Jään voimat
rakenteeseen

Kuva 30. Kitkan vaikutus jään irtoamishetkellä.
[6, s. 120]

Voimatasapainon vuoksi pysty- ja vaakavoiman välille saadaan yhteys

$$H = V \left(\frac{\sin \alpha + \mu \cos \alpha}{\cos \alpha - \mu \sin \alpha} \right) \quad (54)$$

jossa α on kartion kaltevuuskulma

μ jään ja rakenteen välinen kitkakerroin

Pystyvoiman raja-arvo saavutetaan, kun jää murtuu taipumalla. Croasdale on määrittänyt pystyvoiman V palkkiteorian pohjalta

$$V = 0,68 \sigma_f b \left(\frac{\rho_w g t^5}{E} \right)^{1/4} \quad (55)$$

Tekijät määritetään kuten kohdassa 5.2.2.3.

5.4.2.3 Leveät rakenteet

Kiinnijäätyriskuormia voidaan arvioida samoilla menetelmillä kuin kapeille ja keskileveille rakenteille. On kuitenkin huomattava, että paikallisesti kiinnijäätyriskuormat vaihtelevat paljon. [6, s. 138]

5.5 Dynaamiset kuormat

Dynaaminen kuormitustilanne jään ja rakenteen välillä saa alkunsa, kun rakenne taipuu jään vaikuttaessa siihen, kunnes kuormitus saavuttaa jään murskautumislujuuden, jolloin rakenteeseen varastoitunut energia vapautuu ja jää murskautuu. Energiatason aletessa jään murskautuminen loppuu ja edellä kuvattu vuorovaikutus rakenteen ja jään välillä toistuu. Ilmiö saattaa aiheuttaa rakenteeseen niin voimakkaita värähtelyjä, että rakenne murtuu tai väsyä, vaikka sen kestävyys riittäisi vakiosuuruisille jäävoimille. [6, s. 87]

5.5.1 Kuormitusohjeet

Rakenteen leikatessa liikkuvaa jääkenttää rasittaa rakennetta dynaaminen kuorma siten, että kuorma kehityttyään täyteen arvoonsa P_0 voi äkillisesti pudota nolnaan. Kuorman P_0 suuruus määritetään kaavalla [37, s. 60]

$$\begin{aligned} \text{tai} \quad P_0 &= P_1 \\ P_0 &= P_2 \end{aligned} \quad (56)$$

Kuormia P_1 ja P_2 kohdan 5.2.1.2 mukaan määritettäessä käytetään kosketuskertoimelle k_2 arvoa 0,5.

Heilahdustaajuus voi puristusmurrossa vaihdella rajoissa 0,5...10 Hz ja taivutusmurrossa 0...1 Hz. Rakenteen vaste dynaamisessa analyysissä otetaan huomioon rakenteiden mekaniikan menetelmin.

Jään liikesuuntaa vastaan kohtisuorassa suunnassa kuorman suuruudeksi oletetaan vähintään 10 % maksimikuormasta p_1 , P_2 , P_v ja P_0 .

5.5.2 Venäläinen jokistandardi

Venäläisen jokistandardin mukaan voidaan liikkuvan jääkentän aiheuttama iskumainen kuorma laskea elastisesti myötävälle pilarille. Voimaksi valitaan pienempi arvoista [6, s. 88]

$$P_6 = m_j R_c b h_{jää} \quad [\text{tonnia}] \quad (57)$$

$$P_6 = 0,3 v_{jää} h_{jää} \left(\frac{\Omega}{k_y h_{jää} + 0,2/R_c m_e} \right)^{1/2} \quad [\text{tonnia}] \quad (58)$$

joissa m_j saadaan taulukosta 9

R_c on jään murskautumislujuus

b rakenteen julkisivun leveys

$h_{jää}$ jään laskettu paksuus [m], joka oletetaan yhtäsuureksi kuin 0,8 kertaa jään maksimipaksuus koko talvikauden aikana 1 %:n luotettavuudella

$v_{jää}$ jääkentän nopeus [m/s], joka on saatu todellisista havainnoista. Jos näitä ei ole saatavissa, $v_{jää}$ voidaan olettaa altaiden ja merien tapauksissa yhtäsuureksi kuin 3 % tuulen nopeudesta jäiden liikkuesssa 1 %:n luotettavuudella, ei kuitenkaan yli 1 m/s

Ω jääkentän pinta-ala, joka on saatu todellisten havaintojen perusteella rakenteiden sijaintipaikalla tai lähellä sitä

k_y pilarin jousivakio

m_e saadaan taulukosta 9

Taulukko 9. Kertoimet m_j ja m_ϵ . [6, s. 89]

Kertoimet	Muotokertoimet m_j ja m_ϵ pilarille, jonka muoto on							
	Monisärmiö (puoli- ympyrä)	Suora- kulmainen	Kolmikulmainen, jonka avoin kulma on vaakatasossa					
			45°	60°	75°	90°	120°	150°
m_j	0,9	1,00	0,54	0,59	0,64	0,63 ^q	0,77	1,00
m_ϵ	2,4	2,7	0,2	0,5	0,8	1,0	1,3	2,7

5.5.3 Likimääräismenetelmä

Jään murskautumistaajuus voidaan laskea likimääräisesti Määttäsen esittämällä kaavalla, kun rakenteen hitausvaimennukset ovat pieniä verrattuna jäävoimiin. [6, s. 87]

$$f \leq \frac{k * v}{F} \quad (59)$$

jossa k on rakenteen jousivakio

v jään nopeus

F jään murskautumisvoima

Tarkka laskenta voidaan tehdä tietokoneella matriisiyhtälöllä [6, s. 87]

$$[K]\{\delta\} + [D]\{\dot{\delta}\} + [M]\{\ddot{\delta}\} = \{F(\delta)\} \quad (60)$$

jossa $[K]$ on rakenteen tai jään jäykkyyismatriisi

$[D]$ rakenteen tai jään vaimennusmatriisi

$[M]$ rakenteen tai jään massamatriisi

$\{\delta\}$ siirtymävektori

$\{\dot{\delta}\}$ nopeusvektori

$\{\ddot{\delta}\}$ diskreettinen vapausasteiden kiihtyvyyisvektori

$\{F(t)\}$ kuormitusvektori

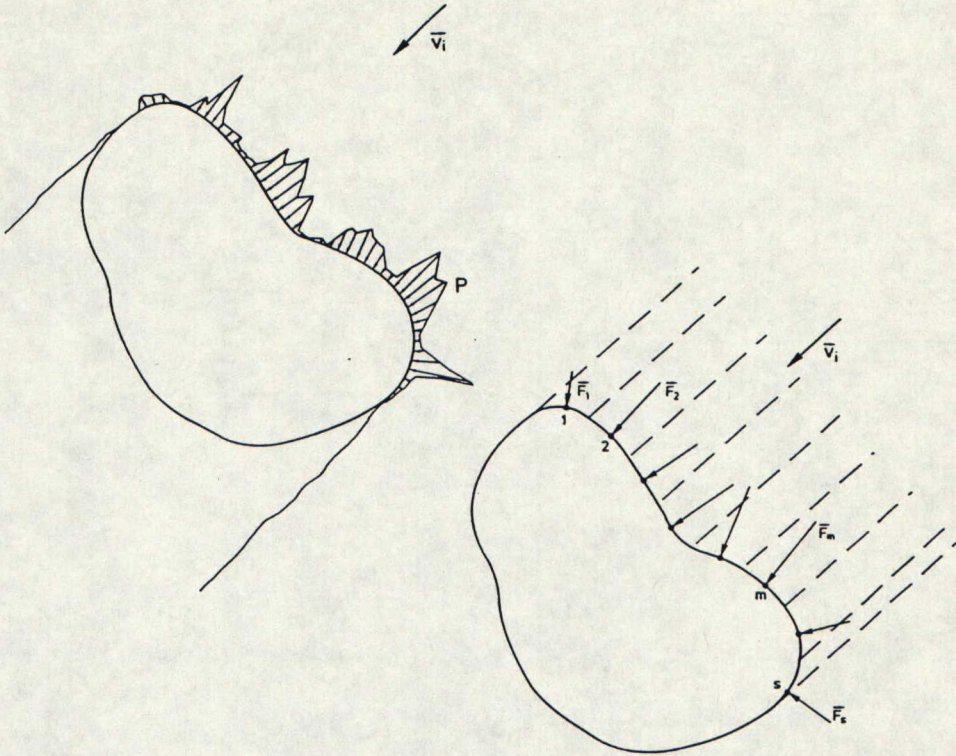
5.5.4 Jään ja rakenteen dynaamisen vuorovaikutuksen malli [39]

Eranti esittää väitöskirjassaan teorian, joka soveltuu dynaamisten jääkuormien arvioimiseen jään murskautuessa pystysuoraa rakennetta vasten sekä yhdistetyssä murskautumisessa ja leikkautumisessa kaltevaa rakennetta vasten. Menetelmässä ei huomioida muiden murtumistapojen mahdollisesti aiheuttamia vähennyksiä jääkuormaan.

Kun jää murtuu kiinteää rakennetta vasten murtumalla tai murtumisen ja leikkautumisen yhteisvaikutuksesta, paikallinen jäänpaine vaihtelee suuresti rakenteen leveydellä. Tämän vuoksi kosketuspinta jaetaan yksittäisiin vyöhykeisiin ja vyöhykejääkuorma kohdistetaan kosketusvyöhykkeen keskellä olevaan pisteeseen. (ks. kuva 31)

Paikalliset ja kokonaisjäänpaineet eivät riipu ajasta, vaan jään ja rakenteen vuorovaikutuksesta. Rajapinnalla rakenne joko koskettaa ehjää jään reunaa tai ei kosketa. Ehjän jään oletetaan taipuvan paineen vaikutuksesta ja taipuman suuruus on vyöhyketunkeuma P . Joka kerta kun jääkuorma saavuttaa kriittisen arvon, jään oletetaan murtuvan etäisyydellä FZ kosketuspinnan edessä. [39, s. 20]

Kun lasketaan vyöhyke- ja aluejääkuormia, on tarkkailtava jään reunan ja rakenteen kosketuspinnan välisiä etäisyyksiä. Tämä tehdään siten, että muutetaan rakenteen kosketuspinta epäjatkuviksi kosketuspisteiksi ja käsitellään jään reunaa sarjana jääreunaviivoja. Yksinkertaistus on sallittua, kun vyöhyketunkeuma P ja murtopituus FZ ovat pieniä verrattuna vuorovaikutusvyöhykkeen leveyteen ja rakenne on melko sileä. [39, s. 21]



Kuva 31. Jäänpaineen jakauma ja sen paikallinen epäjatkuvuus (Eranti, 1992) [39, s. 18]

Rakenteen vaste ja jääkuorma voidaan laskea rakenteen liikeyhtälöstä [39, s. 26]

$$[m]\{u(t)\} + [c]\{u(t)\} + [k]\{u(t)\} = \{F(t)\} \quad (61)$$

jossa $[m]$ on massamatriisi

$[c]$ vaimennusmatriisi

$[k]$ jäykkyysmatriisi

$\{u(t)\}$ siirtymävektori, joka on ajan funktio

$\{F(t)\}$ voimavektori, joka on ajan funktio

Yhtälöä on vaikea integroida suoraan, koska alussa valittiin vyöhykelähestymistapa. Yhtälö on iteroitava. Raken-

teen siirtymiä approksimoidaan aika-askeleen alussa valitsevan tilanteen mukaisesti. [39, s. 27] (Wilson 1978).

$$\{u_c(t+\Delta t)\} = \{u_c(t)\}\Delta t + \{\dot{u}_c(t)\}\Delta t + 1/2\{\ddot{u}_c(t)\}\Delta t^2 \quad (62)$$

Tätä approksimaatiota käytetään vyöhyke- ja kokonaisjääkuormakomponenttien laskemiseen edellä kuvattujen periaatteiden mukaan. Tehokas kuormitus lasketaan kaavasta [39, s. 27]

$$\begin{aligned} \{\hat{F}(t+\Delta t)\} = \{F(t+\Delta t)\} + [m](&a_0\{u(t)\} + a_2\{\dot{u}(t)\} \\ &+ a_3\{\ddot{u}(t)\}) + [c](&a_1\{u(t)\} + a_4\{\dot{u}(t)\} + a_5\{\ddot{u}(t)\}) \end{aligned} \quad (63)$$

Integrointivakiot ovat:

$$\begin{aligned} a_0=4/\Delta t^2, \quad a_1=2/\Delta t, \quad a_2=4/\Delta t, \quad a_3=1, \quad a_4=1, \\ a_5=0, \quad a_6=\Delta t/2, \quad a_7=\Delta t/2 \end{aligned} \quad (64)$$

Tämän jälkeen voidaan käyttää parempaa approksimaatiota siirtymille jään tasossa laskettaessa uusia estimaatteja vyöhyke- ja kokonaisvoimakomponenteille. Iterointia jatketaan kunnes päästään haluttuun tarkkuuteen.

Tutkimuksessa tultiin siihen tulokseen, ettei sivusuhte- tai paine - pinta-ala -käyrillä saada oikeita jääkuormien arvoja ja että niiden käyttö on joissakin tapauksissa jopa vaarallista. Jokainen kuormitustilanne on erikoistapaus dynaamisesta jään ja rakenteen vuorovaikutuksesta ja tehokas jäänpaine sekä rakenteen vaste riippuvat voimakkaasti rakenteen geometrisista ja dynaamisista ominaisuuksista. [39, s. 3]

6 SAARISTON JA SUOJAISTEN ALUEIDEN RAKENTEIDEN JÄÄKUORMAT

6.1 Jään lämpölaajeneminen

Ilman kohoava lämpötila aiheuttaa tasaisen jään laajenemista. Jään laajetessaan aiheuttama kuorma riippuu lämpötilan muutosnopeudesta, jään kosketuksesta ympäristöönsä ja jään paksuudesta. [4, s. 29] Lämpötilan muutoksesta dT aiheutuu jäähän suhteellinen pituudenmuutos

$$d\epsilon = \alpha dT \quad (65)$$

jossa α on pituuden lämpölaajenemiskerroin. Michelin mukaan [40, s. 250] pituuden lämpölaajenemiskerroin on

$$\alpha = (5,4 + 0,018T) * 10^{-5} \text{ 1/}^{\circ}\text{C} \quad (66)$$

jossa T on lämpötila [$^{\circ}\text{C}$]

Lämpölaajeneminen aiheuttaa suurimman paineen alkutalvesta, kun jää on vasta muodostunut ja lumeton, koska myöhemmin lumipeite toimii lämmöneristeenä. Vastasataneen lumen lämmönjohtavuus on vain 10...30:s osa jään lämmönjohtavuudesta. [15, s. 10] [41, s. 3]

6.2 Termiset jääkuormat

Terminen jääkuorma syntyy, kun ranta tai rakenne estää jään lämpölaajenemisen. Termistä kuormitusta määritettäessä on erotettava toisistaan kiinteät rakenteet ja rakenteet, joiden on mahdollista liikkua. Kiinteän rakenteen tulee kestää jyrkästä rannasta työntyvän halkeilleen jääkuoren lämpölaajenemisesta aiheutuva koko kuorma. Jotta rakenteen liikkumismahdollisuudesta olisi suurin mahdollinen hyöty, rakenne tulee suunnitella siten, että se voi siirtyä joissakin tapauksissa useita metrejä. Siirtyvään rakenteeseen kohdistuva paine voidaan olettaa pieneksi, koska normaalisti halkeillut jääkuori voi kurtistua ja laajeta vapaasti. [42, s. 1 & s. 117]

Termisiä jääkuormia arvioitaessa (taulukko 10) käytetään Pohjois-Amerikassa, Pohjoismaissa ja entisessä Neuvostoliitossa arvoja väliltä 0,05...0,30 MN/m paikallisten olosuhteiden ja rakenteen joustavuuden perusteella sekä sen mukaan, kuinka vapaasti lämpöliikkeet voivat tapahtua. Termisiä jääkuormia määritettäessä oletetaan, että yli 40 cm paksut jääpeitteet ovat harvoin lumipeitteettömiä ja halkeilemattomia. [15, s. 11]

Taulukko 10. Jään lämpölaajenemisen aiheuttama staattinen kuorma eri maiden normien mukaan. [15, s. 11]	
Lähde	kN/m h = 60 cm
USSR SN-76/59	173
Kanada	
Betonipadot	150
Väylämerkit	375
Ruotsi	45 - 300 (eri paksuuksia)

Franssonin väitöskirjassa on tarkasteltu termisiä jääkuormia olosuhteissa, joissa jää on haurasta ja liikumatonta siihen saakka, kunnes se on osittain kulunut. Jääkuoren oletetaan olevan enimmäkseen makean veden puikkojäätä ja sen paksuus on 0,2...2 m. Jää on lumetonta ja siinä on lämmön aiheuttamia halkeamia. Sisäistä laajenemista tapahtuu, kun pienet, kuivat halkeamat sulkeutuvat. Jään paineen oletetaan aiheutuvan yksisuuntaisesta lämpövirrasta, jossa lämpötila jään pinnoilla tiedetään. Tuulen takia pintalämpötila on suunnilleen sama kuin ilman lämpötila ja jään alapinta on aina sulamispisteessä. Lämpötila missä tahansa jääkuoren pisteessä voidaan

laskea lämmönjohtavuuskaavalla. Kiinteän rakenteen tai rannan läheisyydessä pinta voi lämmitä yhtäkkiä tulvaveden takia. [42, s. 35]

Tarkastellaan joka suunnalta kiinnitettyä jääkuorta. Suurin jännitys jääkuoren keskellä on [42, s. 119]

$$\sigma_{0,5}^{\max} = a_3 (-T_0)^{1,5}/d \quad (67)$$

(d > 0,5 m)

jossa $\sigma_{0,5}^{\max}$ on suurin jännitys jään keskellä

$$a_3 = 0,3331 \alpha/c$$

α jään pituuden lämpölaajenemiskerroin

c jään virumisvakio

T_0 jään pinnan alkulämpötila

d jään paksuus

Jään kokonaisvaakavoimaa P voidaan estimoida kaavalla

$$P = \beta \sigma_{0,5}^{\max} d \quad (68)$$

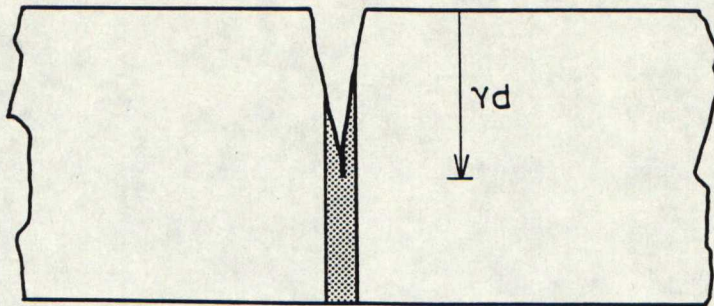
jossa β on jännitys jakauman muotofunktio

$\beta = 1$ suorakulmiolle

Jäähän vaikuttava voima pienenee, jos jään liike ei ole täysin estettyä tai jos jäässä on leveitä halkeamia. Redusoitu kuorma lasketaan kaavalla

$$P_c = P (1-\gamma)^{1,5} \quad (69)$$

jossa γd on halkeaman syvyys (ks. kuva 32)



Kuva 32. Leveä halkeama jääkuoressa. [42, s. 67]

Termisen jääkuorman arvo voidaan nyt määrittää kaavojen (66), (67) ja (68) avulla.

$$P_c = \beta a_3 [(1-\gamma)(-T_0 + \Delta T)]^{1,5} \quad (70)$$

jossa P_c on terminen jääkuorma [kPa]

$$\beta = 0,7$$

$$a_3 = 0,0331 \alpha/c$$

α on jään pituuden lämpölaajenemiskerroin

c jään virumisvakio

γd halkeaman syvyys [m]

T_0 jään pinnan alkulämpötila [$^{\circ}\text{C}$]

ΔT lämpötilan muutos

$$= 5 L (100 d) \quad [^{\circ}\text{C}] \quad (0 \leq L \leq 100 d)$$

$$= 5 \quad [^{\circ}\text{C}] \quad (L > 100 d)$$

L on rajoittuvan jääkuoren pituus

Tutkimuksen perusteella voidaan esittää yksinkertainen kaava, josta saadaan ohjearvo termiselle jääkuormalle. Kaavan tekijällä a_3 on tärkeä merkitys lopputulokseen. Jos ei tehdä muita halkeilusta aiheutuvia vähennyksiä, on kertoimen $a_3 = 3$ arvo varmallalla puolella. [42, s. 124] Kaavassa 69 $\gamma = \Delta T = 0$. Siitä saadaan

$$P_c = 2 (-T_0)^{1,5} \quad [\text{kN/m}] \quad (71)$$

jossa T_0 on alkulämpötila [$^{\circ}\text{C}$]

Lämpötilaksi tulee valita kylmin viikkolämpötila kymmenen vuoden ajalta. Jos tiedossa on vain pienin päivälämpötila, tulee tähän lämpötilaan lisätä $+5^{\circ}\text{C}$. Alueilla, joissa jään paksuus on alle 0,5 m, terminen jääkuorma on pienempi kuin kaavalla (71) saadaan. [42, s. 124]

7 YHTEENVETO

Ohjearvojen antaminen jääkuormille on vaikeaa, koska jään ja rakenteen vuorovaikutukseen vaikuttavat monet tekijät: jään ominaisuudet ja liikkeet sekä rakenteen muoto, koko ja liikkumismahdollisuudet. Esimerkiksi Ruotsin normien mukaiset termisten jääkuormien suunnitteluarvot siltapilareille vaihtelevat välillä 25...200 kN/m. Vain riittävästi kokemusta omaava suunnittelija pystyy valitsemaan järkevän kuorman näin laajalta vaihteluväliltä. [42, s. 124]

Suomen kuormitusohjeiden puutteita ovat: kartion adheesiolujuutta ei tunneta kiintojäävoimia laskettaessa, kartio- ja sylinterikuormiksi sekä joustavien rakenteiden jääkuormiksi saadaan liian pieniä arvoja. Jatkossa olisi syytä tutkia ainakin kiinnijäätymiskuormia kartioon ja nykyisin käytössä oleviin väylämerkkeihin. (Eranti 18.8.92)

Jäätutkimustulokset eivät ole mitenkään vaikuttaneet nykyisin käytössä oleviin jääkuormitusohjeisiin. Niiden laajuus on riittävä, mutta niitä olisi syytä selkeyttää. Kuormitusohjeisiin tulisi lisätä perusjääfysiikkaa, tosin täsmällistä tietoa jäästä ei ole olemassa, sillä jään ominaisuudet riippuvat monesta tekijästä. (Määttänen 28.8.92) Valitsemalla nykyisten kuormitusnormien kaavojen lukuisista kertoimista yksikin väärin voidaan saada 0,1...10 -kertaisia kuormia verrattuna todellisiin.

ASiantuntijahaastattelut

Esa Eranti, Insinööritoimisto Lauri Pitkälä

Hannu Grönvall, Merentutkimuslaitos, Jääpalvelu

Antti Hepojoki, Teknillinen korkeakoulu, Rakennus- ja maanmittaustekniikan osasto

Klaus Martonen, Merenkulkuhallitus, Väyläosasto

Mauri Määttänen, Teknillinen korkeakoulu, Konetekniikan osasto

KUVALUETTELO

1. Vesimolekyyli (a) ja pieni osa jääkidettä (b).
[2, s. 16-4]
2. Jääkuoren suolaisuusprofiileja. (Weeks & Assur, 1967)
[3, s. 2.7]
3. Itämeren pintaveden keskimääräinen suolaisuus marras-
kuussa. [7, s. 5]
4. Suolavesipitoisuus jään suolaisuuden ja lämpötilan funk-
tiona. (Anderson, 1960) [3, s. 2.7]
5. Adheesiolujuus jään suolaisuuden funktiona. [6, s. 69]
6. Tasaisen jään maksimipaksuus (cm) vuosina 1920-1980.
[10, s. 6]
7. Ahtojäävallin poikkileikkaus. [11, s. 21]
8. Jäälautan taivutusmurto. [13, s. 122]
9. Jäälautan ja etureunastaan kaltevan virtapilarin törmäys.
[13, s. 119]
10. Jäälautan kitkavoimat. [15, s. 14]
11. Suurin odotettavissa oleva liikkuvan jään paksuus 30
vuoden aikana Suomen rannikolla. [10, s. 18]
12. Jään laajin ulottuvuus 1985/86. [16, s. 4]
13. Rakenteeseen vedenpinnan vaihdellessa aiheutuvat nostava
ja alas vetävä voima. [4, s. 30]
14. Jään lujuus eri suunnissa. (Peyton, 1966) [34, s. 73]

15. Kiinteän jääpeitteen laskennallinen maksimipaksuus (m).
[36, s. 56]
16. Hydrodynaamisen muotokertoimen μ_k arvot. [36, s. 52]
17. Lämpötilan kohoamisen takia laajenevan jääkentän aiheuttamat maksimikuormat jääkenttää rajoittaviin seinämiin.
[36, s. 57]
18. Tunkeumakerroin I. [6, s. 29]
19. Puoliupotetun rakenteen jalkojen sijoittelumallit.
[6, s. 76]
20. Jääkuorman riippuvuus rakenteen leveydestä. [6, s. 78]
21. Leveän, tasaisen pystysuoran seinän tunkeutuminen murskautuneeseen jäähän. [6, s. 40]
22. Ahtojäävallin kaksipuolinen leikkautuminen. [6, s. 108]
23. Yksivuotisen ahtojään aiheuttamat jääkuormat. [6, s. 110]
24. Tasaisen jään ja ahtojään aiheuttama painejakauma pystysuoraan rakenteeseen. [6, s. 39]
25. Kerroin k_s . [36, s. 62]
26. Rakenteeseen kiinnijäätymisestä aiheutuvat kuormat.
[6, s. 91]
27. Kertoimet A_1 ja A_2 . [6, s. 98]
28. Kertoimet A_3 , A_4 , B_1 ja B_2 . [6, s. 98]
29. Kiinnijäätymissidoksen murtuminen. [6, s. 119]

30. Kitkan vaikutus jään irtoamishetkellä. [6, s. 120]
31. Jäänpaineen jakauma ja sen paikallinen epäjatkuvuus.
(Eranti, 1992) [38, s. 18]
32. Leveä halkeama jääkuoressa. [41, s. 67]

TAULUKKOLUETTELO

1. Kerroin C_0 kiilakulman 2α ja kaltevuuskulman β funktiona (Korzhavin) [13, s. 124]
2. Kontaktikertoimen k riippuvuus pilarin leveydestä ja jäälauttojen nopeudesta. [13, s. 113]
3. Mitattuja kertoimen z_0 arvoja. [14, s.2]
4. Jää- ja lumipeitteen paksuudet cm:ssä talvella 1985/86. [16, s. 38]
5. Kertoimen μ_i arvoja. [36, s. 41]
6. Kerroin k_1 . [36, s. 59]
7. Kerroin k_v . [36, s. 62]
8. Muovautumiskerroin μ . [6, s. 92]
9. Kertoimet m_j ja m_e . [6, s. 89]
10. Jään lämpölaajenemisen aiheuttama staattinen kuorma eri maiden normien mukaan. [15, s. 11]

LÄHDELUETTELO

1. Sovellettu hydrologia. Vesiyhdistys r.y. Helsinki 1986. 503 s.
2. Chow, Ven Te. Handbook of applied hydrology. USA 1964. McGraw-Hill. 1418 s.
3. Eranti, E., Lee, G.E. Introduction to ice problems in civil engineering. State University of New York at Buffalo, Department for cold regions engineering, science and technology. 1981.
4. Design recommendations for ice effects on aids-to-navigation. International association for lighthouse authorities. Final report of the IALA technical committee to study the effect of ice on lighthouse structures. Paris 1984. 55 s.
5. Leppäranta, M. On the structure and mechanics of pack ice in the Bothnian bay. Finnish marine research. Helsinki 1981. 86 s.
6. Määttänen, M., Krankkala, T., Hoikkanen, J., Pulkkinen, E. Laskentaperiaatteita avomerirakenteiden jääkuormille. Oulu 1984, Oulun yliopisto, Raportti n:o 43. 182 s.
7. Weeks, W.F., Gow, A.J., Kosloff, P., Digby-Argus, S. The internal structure, composition and properties of brackish ice from the Bay of Bothnia. Proceedings of the W.F. Weeks Sea Ice Symposium, 1990, U.S. Army Corps of Engineers.
8. Fransson, L., Håkansson, B., Omstedt, A., Stehn, L. Sea ice properties studied from the icebreaker Tor during BEPERS-88. Luleå University of Technology. Norrköping 1990. 20 s.

9. Kankaanpää, P. Morphology of Baltic sea ice pressure ridge. Helsinki 1988, Institute of Marine Research, Geophysica (1988), Vol 24, Nos. 1-2, pp 15-33.
10. Palosuo, E., Leppäranta, M., Seinä, A. Formation, thickness and stability of fast ice along the Finnish coast. Helsinki 1982, Winter navigation research board, Research report no 36. 19 s.
11. Keinonen, A. Presentation of sea ice ridges in general and physical characteristics of Baltic ridges for ship resistance calculations. Helsinki 1978, Winter navigation research board, Research report no 24. 19 s.
12. Suomalainen kylmän ilmaston rakennustekniikka Osa 2, Kunnallistekniikka ja maa- ja vesirakentaminen. Espoo 1990, Valtion teknillinen tutkimuskeskus, Tiedotteita 1105. 112 s.
13. Eranti, E. Rakenteiden jääkuormat ja jään kantokyky. Tie- ja vesirakennushallitus, Vesitietosasto. Helsinki 1978. 185 s.
14. Karri, J. Kiinteiden rakenteiden jääkuormat. Arktinen tekniikka -symposium, 1.-2.12.1981. Espoo 1981, Valtion teknillinen tutkimuskeskus. 24 s.
15. Lehmus, Eila. Jääkentän aiheuttamat vaakasuorat kuormat. Espoo 1983, Valtion teknillinen tutkimuskeskus, Tiedotteita 183. 61 s.
16. Seinä, A., Kalliosaari, S. Jäätalvet 1986-1990 Suomen merialueilla. Helsinki 1991, Merentutkimuslaitos, N:o 259. 68 s.

17. Joensuu, A., Varsta, P. Arktisiin olosuhteisiin liittyvä tutkimus Suomessa. Valtion teknillinen tutkimuskeskus, Laivatekniikan laboratorio. 1981. 28 s.
18. Kajaste-Rudnitski, J., Jumppanen, P., Sackinger, W. Ice loads upon a cylindrical offshore structure. Espoo 1985, Technical Research Centre of Finland, Research Notes 432. 46 s.
19. Kujala, P., Riska, K., Koskivaara, R., Nyman, T. Results from in situ four point bending tests with Baltic sea ice. IAHR 90, 20.-23.8.1990. Espoo 1990, Proceedings of the 10th international symposium on ice, Vol 1. S. 261-278.
20. Enkvist, E., Eranti, E. Development of arctic offshore technology. Helsinki 1990, Technology Development Centre. 96 s.
21. Muhonen, A., Kärnä, T., Eranti, E., Riska, K., Järvinen, E., Lehmus, E. Laboratory indentation tests with thick freshwater ice, Vol I. Espoo 1992, Technical Research Centre of Finland, Research Notes 1370. 92 s.
22. Eranti, E. Numerical simulation of dynamic ice structure interaction. IAHR 90, 20.-23.8. 1990. Espoo 1990, Proceedings of the 10th international symposium on ice, Vol 2. S. 912-922.
23. Kajaste-Rudnitski, J. Stokastic approach to the ice-structure interaction. IAHR 90, 20.-23.8. 1990. Espoo 1990, Proceedings of the 10th international symposium on ice, Vol 2. S. 961-973.

24. Kärnä, T., Muhonen., A. Preliminary results from ice indentation tests using flexible and rigid indentors. IAHR 90, 20.-23.8. 1990. Espoo 1990, Proceedings of the 10th international symposium on ice, Vol 3. S. 261-275.
25. Gowda, S.S., Hakala, R., Lehmus, E. Ice forces on model arctic structures. Polartech '86, 27.-30.10.1986. Espoo 1986. International offshore and navigation conference and exhibition. VTT symposium 71. Vol 2. S. 693-706.
26. Jalonen, R., Ilves, L. Experience with a chemically-doped fine-grained model ice. IAHR 90, 20.-23.8.1990. Espoo 1990, Proceedings of the 10th international symposium on ice, Vol 2. S. 639-651.
27. Inkari, H. Navigointipoijututkimus pienoismallikokein, diplomityö, Teknillinen korkeakoulu, rakennusinsinööriosasto. Espoo 1979. 87 s.
28. Määttänen, M., Hoikkanen, J. The effect of ice pile-up on the ice force of a conical structure. IAHR 90, 20.-23.8. 1990. Espoo 1990, Proceedings of the 10th international symposium on ice, Vol 2. S. 1010-1021.
29. Määttänen, M. Test cone project. Polartech '86, 27.-30.10.1986. Espoo 1986. International offshore and navigation conference and exhibition. VTT symposium 71. Vol 2. S. 749-761.
30. Rantamäki, J. Jään kuormituskokeita talvella 1971-1972 Oulu-Kemi syväväylää varten. Oulu 1972, Suunnittelukorttes Oy. 33 s.
31. Alaluusua, M. Poijututkimus luonnonolosuhteissa. Helsinki 1980, Merenkulkuhallitus.

32. Palosuo, E. Ahtojään muodostumisesta ja rakenteesta Itämerellä. Esitelmä "Perämeri-päivillä Kemissä 12.6.1972.
33. Leppäranta, M., Lewis, J.E., Granberg, H.B. The occurrence and size of ice ridges in the Baltic sea. IAHR 90, 20.-23.8.1990. Espoo 1990, Proceedings of the 10th international symposium on ice, Vol 1. S. 314-323.
34. Kankaanpää, P., Stringer, W. Baltic sea ice ridges studied by field measurements, synthetic aperture radar, airphotos and laser profilometer. IAHR 90, 20.-23.8. 19-90. Espoo 1990, Proceedings of the 10th international symposium on ice, Vol 2. S. 1130-1143.
35. Eranti, E., Lee, G.C. Cold region structural engineering. New York 1986. 529 s.
36. Hellevaara, M., Joensuu, A. Meritekniikka ja sen soveltaminen arktisiin vesiin. Valtion teknillinen tutkimuskeskus, Laivatekniikan laboratorio. Espoo 1979. 107 s.
37. Rakenteiden kuormitusohjeet. Helsinki 1983, Suomen rakennusinsinöörien liitto, 144. 171 s.
38. Joensuu, A. Arktisille merialueille soveltuvat öljyn- ja kaasunporaustasanteet, diplomityö, Teknillinen korkeakoulu, koneinsinööriosasto. Espoo 1981. 130 s.
39. Eranti, E. Dynamic ice structure interaction, Theory and applications. Espoo 1992, Technical Research Centre of Finland, Publications 90. 81 s.
40. Michel, B. Ice Mechanics. Les Presses de l'Université Laval. Québec 1978. 499 s.

41. Michel, B. Ice pressure on engineering structures. Cold regions research and engineering laboratory. Hanover, New Hampshire 1970. 71 s.
42. Fransson, L. Thermal ice pressure on structures in ice covers, doctoral thesis, Luleå University of Technology. Luleå 1988. 161 s.